

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Ružica Budim**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Student:

Ružica Budim

Zagreb, 2018.

*Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje i navedenu literaturu.*

*Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Tei Žakuli na ukazanom povjerenju, svim prenesenim znanjima, izdvojenom vremenu, podršci i motivaciji tijekom izrade ovog diplomskog rada. Konstantnim navođenjem i usmjeravanjem pomogla mi je otkriti način na koji inženjer treba razmišljati te me upoznala s područjem energijskih simulacija u TRNSYS-u na čemu sam joj dodatno zahvalna.*

*Zahvaljujem se Energetskom institutu Hrvoje Požar, a posebno dr. sc. Goranu Graniću na ostvarenoj mogućnosti rada u institutu prilikom pisanja diplomskog rada.*

*Za kraj, najveće hvala mojim roditeljima, Mariji i Iliji, na svim lijepim trenucima, potpori, ohrabrenjima, brizi i ljubavi. Ovaj rad je rezultat vašeg rada.*

*Ružica Budim*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ružica Budim** Mat. br.: 0035190996

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza osjetljivosti energijskih simulacija stambene zgrade**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Sensitivity Analysis of Residential Building Energy Simulations**

### Opis zadatka:

Prvi korak pri izradi pojednostavljenih modela za predviđanje potrošnje energije zgrade jest određivanje glavnih utjecajnih veličina te analiza njihovog utjecaja na toplinski odziv i energijska svojstva zgrade. Cilj rada je provođenje analize osjetljivosti rezultata simulacije, prvenstveno potrebne energije za grijanje i hlađenje, u ovisnosti o ulaznim parametrima zgrade. Analizu je potrebno provesti na primjeru stambene zgrade „Mamutice“ za tipičnu meteorološku godinu u gradu Zagrebu. Za ulazne podatke koristiti dostupnu projektnu dokumentaciju te informacije dobivene od stanara zgrade. Simulaciju toplinskog odziva zgrade u ovisnosti o utjecajnim parametrima provesti u detaljnom računalnom programu za energijsko modeliranje, TRNSYS.

### Rad treba sadržavati:

- opis analizirane zgrade,
- opis metode za analizu osjetljivosti,
- opis rezultata analize osjetljivosti, prvenstveno na temelju analize potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje,
- energijski model svih analiziranih slučajeva.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

27. rujna 2018.


Datum predaje rada:

29. studenog 2018.

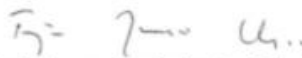
Predviđeni datum obrane:

5., 6. i 7. prosinca 2018.

Zadatak zadao:

  
doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. Opis analizirane zgrade.....	4
3. Matematički model višezonske zgrade u TRNSYS-u .....	8
4. Referentni energijski model <i>Mamutice</i> u TRNSYS-u .....	15
4.1. Analiza rezultata simulacije referentnog modela .....	18
4.2. Analiza rezultata simulacije modela karakterističnog kata .....	20
5. Opis analize osjetljivosti.....	23
5.1. Lokalna analiza osjetljivosti.....	25
6. Analiza osjetljivosti energijskog modela <i>Mamutice</i> .....	27
6.1. Utjecaj infiltracije .....	27
6.2. Utjecaj unutarnjih toplinskih dobitaka .....	30
6.3. Utjecaj U-vrijednosti zida .....	32
6.4. Utjecaj toplinskog kapaciteta zida .....	34
6.5. Utjecaj postavne temperature za grijanje i hlađenje .....	36
6.6. Sumarni rezultati analize osjetljivosti energijskih simulacija <i>Mamutice</i> .....	40
7. ZAKLJUČAK.....	44
LITERATURA.....	46
PRILOZI.....	47

## POPIS SLIKA

Slika 1 Zračni prikaz Velike i Male Mamutice iz sjeverozapadnog smjera.....	4
Slika 2 3D model osmog ulaza Mamutice .....	5
Slika 3 Karakteristični stanovi i njihova orijentacija .....	5
Slika 4 Toplinska ravnoteža konvektivnih dobitaka unutar jedne zone.....	9
Slika 5 Izmjena topline zračenjem unutar jedne zone za jedan zid i njegovu temperaturu površine .....	9
Slika 6 Toplinski tok kroz vanjske zidove .....	10
Slika 7 Shema star network modela zone s tri plohe.....	12
Slika 8 Prikaz glavnog simulacijskog modela u korisničkom sučelju Simulation Studio .....	17
Slika 9 Prikaz modela višezonske zgrade u pomoćnom korisničkom sučelju TRNBuild .....	17
Slika 10 Mjesečna potrebna energija za grijanje i hlađenje referentnog modela Mamutice...	18
Slika 11 Potrebna energija za grijanje i hlađenje istočno i zapadno orijentiranog stana na istom katu.....	20
Slika 12 Mjesečna potrebna energija za grijanje i hlađenje karakterističnog kata.....	21
Slika 13 Dijagram toka strukturiranog procesa analize osjetljivosti [9] .....	24
Slika 14 Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene infiltracije.....	29
Slika 15 Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene unutarnjih toplinskih dobitaka.....	31
Slika 16 Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene U-vrijednosti vanjskog zida .....	33
Slika 17 Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene toplinskog kapaciteta vanjskog zida .....	35

Slika 18	Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje za odabrane postavne temperature grijanja .....	37
Slika 19	Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje za odabrane postavne temperature hlađenja.....	38
Slika 20	Promjena potrebne energije za grijanje uslijed promjene utjecajnih veličina .....	41
Slika 21	Promjena potrebne energije za hlađenje uslijed promjene utjecajnih veličina .....	42
Slika 22	Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene ulaznih podataka .....	43
Slika 23	Tlocrt osmog ulaza Mamutice od 1. kata – 10. kata .....	48
Slika 24	Tlocrt osmog ulaza Mamutice od 11.kata – 16. kata .....	49
Slika 25	Tlocrt osmog ulaza Mamutice, 17. kat.....	50
Slika 26	Tlocrt osmog ulaza Mamutice, 18. kat.....	51
Slika 27	Tlocrt osmog ulaza Mamutice, 19. kat.....	52

## POPIS TABLICA

Tablica 1	Površine karakterističnih stanova.....	6
Tablica 2	Sastav zidova analizirane zgrade.....	6
Tablica 3	Ulazni parametri modela zgrade .....	16
Tablica 4	Potrebna energija za grijanje i hlađenje po katovima .....	19
Tablica 5	Usporedba rezultata modela karakterističnog kata i referentnog modela .....	21
Tablica 6	Raspon promjena vrijednosti infiltracije .....	28
Tablica 7	Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene infiltracije.....	29
Tablica 8	Raspon promjena vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka .....	30
Tablica 9	Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene unutarnjih toplinskih dobitaka .....	31
Tablica 10	Raspon promjena U-vrijednosti .....	32
Tablica 11	Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene U-vrijednosti vanjskog zida.....	33
Tablica 12	Raspon vrijednosti kapaciteta zida.....	34
Tablica 13	Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene toplinskog kapaciteta vanjskog zida.....	36
Tablica 14	Raspon promjena postavnih temperatura za grijanje i hlađenje.....	37
Tablica 15	Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene postavne temperature za grijanje .....	39
Tablica 16	Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene postavne temperature za hlađenje.....	39



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
S	$\text{m}^2$	površina
d	m	debljina
$\rho$	$\text{kg}/\text{m}^3$	gustoća
$\lambda$	$\text{W}/(\text{mK})$	toplinska vodljivost
$c_p$	$\text{J}/(\text{kgK})$	specifični toplinski kapacitet
U	$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$	koeficijent prolaza topline
g	-	stupanj propuštanja ukupne energije kroz ostakljenje za slučaj okomitog upada Sunčevog zračenja
IC	-	koeficijent utjecajnosti
n	$\text{h}^{-1}$	broj izmjena zraka uslijed infiltracije
C	$\text{kJ}/(\text{m}^2\text{K})$	toplinski kapacitet zida

## SAŽETAK

U radu je prikazan proces analize osjetljivosti energijskih simulacija na primjeru višestambene zgrade *Mamutica* u gradu Zagrebu. Za simulaciju toplinskog odziva analizirane zgrade u ovisnosti o utjecajnim parametrima korišten je detaljni računalni program TRNSYS, pri čemu je analiza rezultata simulacije provedena prvenstveno na temelju potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrade. Pri definiranju ulaznih parametara zgrade korištene su dostupna projektna dokumentacija prikupljena u arhivi Gradskog ureda za opću upravu grada Zagreba te informacije dobivene od stanara zgrade. Za provedbu analize osjetljivosti na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje varirani su sljedeći ulazni parametri: infiltracija, unutarnji toplinski dobici, U-vrijednost vanjskog zida, toplinski kapacitet vanjskog zida te postavne temperature za grijanje i hlađenje. Prema rezultatima analize promjena infiltracije i U-vrijednost zida predstavljaju najutjecajnije ulazne podatke na ukupnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje, gdje raspon promjene infiltracije od -50% do 100 % uzrokuje promjenu potrebne energije za grijanje i hlađenje u rasponu od -7,9% do 17,3 %, dok raspon promjene U-vrijednosti od -50% do 100% uzrokuje promjenu potrebne energije za grijanje i hlađenje u rasponu od -6,7% do 13,6%. Na temelju dobivenih rezultata moguće je prikazati osjetljivost simulacijskih modela na neizvjesnost u vrijednostima ulaznih parametara. Dobiveni rezultati bit će primijenjeni za analizu drugih zgrada grada Zagreba u daljnjim znanstvenim istraživanjima kao temelj za usporedbu sa stvarnim podacima o potrošnji u zgradi.

Ključne riječi: energijski model zgrade, analiza osjetljivosti, potrebna energija za grijanje i hlađenje

## SUMMARY

This paper analyzes the process of sensitivity analysis of energy simulation on the example of *Mamutica*, an apartment building in the city of Zagreb. To simulate the thermal response of the analyzed building depending on the influencing parameters, a detailed computer program TRNSYS was used, whereby the simulation result analysis was performed primarily on the basis of the required energy for heating and cooling. In the definition of the input building parameters, the project documentation available was collected in the archives of the City Office for General Administration of the City of Zagreb and information obtained from the tenant of the building. The following input parameters were varied for the sensitivity analysis of the required heating and cooling energy: infiltration, internal heat gains, U-value of the external wall, external wall heat capacity and set temperature for heating and cooling. According to the results of the analysis, the change in infiltration and the U-value of the wall represent the most influential inputs to the total required energy for heating and cooling, where the infiltration range of -50% to 100% causes a change in the required heating and cooling energy in the range of -7,9% to 17,3%, while the U-value range of -50% to 100% causes a change in the required heating and cooling energy in the range of -6,7% to 13,7%. Based on the obtained results it is possible to show the sensitivity of the simulation models to uncertainty in the values of the input parameters. The results obtained will be used for the analysis of other buildings of the City of Zagreb in further scientific research as the basis for comparison with the actual data on the consumption of the building.

Key words: energy building model, sensitivity analysis, heating and cooling energy needs

## 1. UVOD

Europska Unija postavlja sve strože zahtjeve u cilju postizanja uštede energije i smanjenja stakleničkih plinova. Zakonom o energetske učinkovitosti (Narodne novine, br. 127/14) uređuje se područje učinkovitog korištenja energije, donošenje planova na lokalnoj, područnoj (regionalnoj) i nacionalnoj razini za poboljšanje energetske učinkovitosti te njihovo provođenje, mjere energetske učinkovitosti i obveze sudionika energetskeg sektora u provođenju mjera energetske učinkovitosti, utvrđivanje ušteda energije te prava potrošača u primjeni mjera energetske učinkovitosti [1]. U zgradarstvu postoji veliki potencijal za uštedu energije i povećanje energetske učinkovitosti s obzirom da se oko 40% isporučene energije u Europskoj Uniji troši upravo u zgradama, a oko 70% te energije troši se u stambenim zgradama za potrebe grijanja, hlađenja, klimatizacije, pripreme potrošne tople vode, rasvjetu, kuhanje te pogon kućanskih aparata [2]. Neke od mjera koje mogu utjecati na uštede energije u navedenom sektoru su korištenje građevinskih materijala niže U-vrijednosti i izolacije, poboljšanje zrakotijesnosti te korištenje uređaja najvišeg razreda energetske učinkovitosti. Na primjer, izuzetno je značajna uloga vanjske ovojnice zgrade jer trajno djeluje na energetska svojstva zgrade, kvalitetu boravka u prostoru i ekološku učinkovitost tijekom čitavog trajanja zgrade. Pri analizi velikog broja mogućih rješenja za određivanje energetske učinkovitosti i ostalih kriterija učinkovitosti zgrada, kao glavno pitanje se postavlja određivanje najdjelotvornijeg niza radnji koje će dugoročno utjecati na zgradu.

Zakonom o tržištu toplinske energije te relevantnim podzakonskim aktima propisano je da se u sve stambene/poslovne prostore spojene na zajedničko mjerilo toplinske energije u određenim rokovima moraju ugraditi elektronički razdjelnici troškova toplinske energije, odnosno uređaji za evidentiranje razmjernog dijela toplinske energije koja se odaje preko ogrjevnih tijela unutar samostalnih uporabnih cjelina. Na taj način svaki kupac samostalno odlučuje o načinu korištenja usluga iz umreženih sustava. Međutim, ugradnja razdjelnika izazvala je nezadovoljstvo potrošača te je stoga potrebno provesti detaljnije analize implementacije Direktive o energetske učinkovitosti u dijelu mjerenja u sustavima daljinskog grijanja. S obzirom da je potrošnja energije u zgradama rezultat međudjelovanja brojnih faktora, kao prvi korak detaljne analize stoga je potrebno provesti analize osjetljivosti u cilju određivanja najutjecajnijih faktora na potrošnju energije. Osim toga, iz rezultata se može zaključiti koliko

kriva pretpostavka vrijednosti ulaznih parametara utječe na konačni rezultat. Analiza osjetljivosti provedena je u ovome radu na primjeru *Mamutice*, po obujmu najveće stambene zgrade u gradu Zagrebu, a koja se također ubraja i među najveće stambene zgrade u Europi. S obzirom na sličnost u građevinskim svojstvima i načinu korištenja svih ulaza zgrade, analiza je provedena za osmi ulaz stambene zgrade za tipičnu meteorološku godinu u gradu Zagrebu, s ciljem pronalaska glavnih utjecajnih veličina na toplinski odziv i energijska svojstva zgrade. Rezultati analize će se primijeniti za analizu drugih zgrada grada Zagreba u daljnjim znanstvenim istraživanjima.

Detaljna energijska analiza zahtijeva nestacionarni, odnosno kvazistacionarni proračun energijskih tokova, koji je olakšan korištenjem računalnih alata. Za simulaciju toplinskog odziva analizirane zgrade u ovisnosti o utjecajnim parametrima korišten je detaljni računalni program TRNSYS, prvenstveno u cilju analize potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrade u ovisnosti o utjecajnim parametrima. Pri definiranju ulaznih parametara korištena je dostupna projektna dokumentacija prikupljena u arhivi Gradskog ureda za opću upravu grada Zagreba te informacije dobivene od stanara zgrade. Izrađeni model sadrži informacije o geometriji zgrade, orijentaciji i nagibu ploha, odabranim materijalima i debljini pojedinih građevinskih elemenata, podjeli na toplinske zone, dobicima od ljudi, rasvjete i opreme, procijenjenoj infiltraciji te postavnim unutarnjim temperaturama.

Analiza osjetljivosti predstavlja ključan parametar prilikom energijskih analiza zgrade u cilju rangiranja utjecajnih parametara na konačan rezultat, a predstavlja formalizirani postupak za identifikaciju učinka promjena u različitim varijablama modela na rezultat modela. Postoji lokalna te globalna analiza osjetljivosti, s osnovnom razlikom da lokalna analiza osjetljivosti uzima u obzir varijaciju samo jedne varijable, dok globalna uzima u obzir varijacije višestrukih varijabli. U okviru ovoga rada, provedena je lokalna analiza osjetljivosti radi određivanja razlike u rezultatima simulacije uzrokovane isključivo promjenama jednog variranog ulaznog parametra. Također je napravljen pregled literature koji daje primjere lokalnih analiza osjetljivosti stambenih zgrada, na temelju kojih su u ovome radu varirani sljedeći ulazni parametri: infiltracija, unutarnji toplinski dobici, U-vrijednost vanjskog zida, kapacitet vanjskog zida te postavne temperature za grijanje i hlađenje u cilju analize različitih preferencija toplinske ugodnosti stanara *Mamutice*. Na temelju rezultata analize osjetljivosti može se zaključiti koliko kriva procjena pojedinog parametra utječe na procjenu potrebne energije za grijanje i hlađenje. Dobiveni rezultati analize osjetljivosti koristit će se u daljnjim znanstvenim istraživanjima kao

temelj i model za analizu stvarnih podataka o potrošnji energije. Također, usporedba simuliranih i stvarnih rezultata omogućava razvoj pojednostavljenih energijskih modela za simulaciju čitavog skupa zgrada unutar definiranih granica. Ovakvi modeli mogu imati različite namjene, na primjer, mogu se koristiti pri ocjeni učinka provedenih mjera energetske učinkovitosti te u energetske planiranju u sektoru toplinarstva.

## 2. Opis analizirane zgrade

*Mamutica* je najveća stambena zgrada po obujmu u gradu Zagrebu, ali se također ubraja među najveće stambene zgrade u Europi. Nalazi se u istočnom dijelu Novog Zagreba, u kvartu Travno. Izgrađena je 1974. godine prema projektu profesora Đure Mirkovića i Nevenke Postružnik, a glavni investitor je bila firma Industrogradnja iz Zagreba. Sastoji se od dvije zgrade, odnosno od *Velike Mamutice* koja ima 6 ulaza te *Male Mamutice* koja ima 3 ulaza. Duga je 240 m, visoka 60 m te ima 19 naseljenih katova s ukupno 1169 stanova u kojima živi oko 5000 stanovnika [3]. Slika 1 prikazuje zračni snimak *Mamutice* iz sjeverozapadnog smjera. S obzirom na sličnost u građevinskim svojstvima i načinu korištenja svih ulaza zgrade, u okviru ovoga rada analiziran je osmi ulaz koji se nalazi u *Velikoj Mamutici*, a njegov model izrađen u računalnom programu za 3D oblikovanje, SketchUp, prikazan je Slikom 2. Spomenuti ulaz sastoji se od 125 stanova koji su raspoređeni na 19. katova. Tlocrti karakterističnih katova dani su u Prilogu 1 (1. kat – 10. kat), Prilogu 2 (11. kat – 16. kat), Prilogu 3 (17. kat), Prilogu 4 (18. kat) i Prilogu 5 (19. kat).



*Slika 1 Zračni prikaz Velike i Male Mamutice iz sjeverozapadnog smjera*



*Slika 2 3D model osmog ulaza Mamutice*

Na svim katovima, osim na 18. katu i 19. katu, nalazi se sedam karakterističnih stanova koji su prikazani na Slici 3. Stan 1 i stan 4 na 18. katu te od 11. kata do 16. kata imaju balkon umjesto lođe, što se za stan 1 može uočiti i na 3D modelu izrađenom u SketchUp-u na Slici 2. Specifične površine karakterističnih stanova prikazane su Tablicom 1.



*Slika 3 Karakteristični stanovi i njihova orijentacija*



Tablica 1 Površine karakterističnih stanova<sup>1</sup>

	Stan 1	Stan 2	Stan 3	Stan 4	Stan 5	Stan 6	Stan 7
	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]
<b>1. kat – 10. kat</b>	53,8	85,6	59,4	61,7	63,4	80,1	36,0
<b>11. kat – 16. kat</b>	59,3	85,6	59,4	66,8	63,4	80,1	36,0
<b>17. kat</b>	53,8	85,6	59,4	61,7	63,4	80,1	36,0
<b>18. kat</b>	59,3	85,6	59,4	61,7	63,4	-	36,0
<b>19. kat</b>	-	-	-	61,7	67,3	-	41,7

U Tablici 2 prikazan je sastav zidova analizirane zgrade. Svi podaci označeni zvjezdicom preuzeti su iz Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama [4], dok su ostali podaci preuzeti iz dostupne projektne dokumentacije. Koeficijent prolaza topline za prozore prema projektnoj dokumentaciji iznosi 3,489 W/(m<sup>2</sup>K), dok je za stupanj propuštanja ukupne energije kroz ostakljenja za slučaj okomitog upada Sunčeva zračenja odabrana vrijednost od 0,759.

Tablica 2 Sastav zidova analizirane zgrade

		d	ρ	λ	c <sub>p</sub>
		[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/(mK)]	[J/(kgK)]
<b>Međukatna konstrukcija</b>  <b>U= 2,266 W/m<sup>2</sup>K</b>	Lamel parket	0,008	700*	0,2326	1600*
	Florbit	0,02	770**	1,9771	947**
	Pluto	0,01	500*	0,0698	1560*
	AB - ploča	0,17	2500*	2,035	1000*
<b>Vanjski zid</b>  <b>U= 1,071 W/m<sup>2</sup>K</b>	Gips	0,01	1500*	0,5815	1000*
	Stiropor	0,03	30*	0,0349	1260*
	Beton	0,06	2400*	1,9771	1000*
<b>Zidovi između soba</b>  <b>U= 3,337 W/m<sup>2</sup>K</b>	Gips	0,07	1500*	0,54*	1000*
<b>Zidovi prema hodniku</b>  <b>U= 1,851 W/m<sup>2</sup>K</b>	Gips	0,2	1500*	0,54*	1000*

\*\* Karakteristike za florbit određene su prema njegovom sastavu (mješavina bitumena i pluta)

<sup>1</sup> Ne uključuje površine balkona i lođa

Prema odredbi propisanoj u Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, broj izmjena unutarnjeg zraka s vanjskim zrakom kod zgrade u kojoj borave ili rade ljudi mora biti najmanje  $0,5 \text{ h}^{-1}$  [4]. Stoga je za analizirani ulaz definirana spomenuta vrijednost infiltracije od  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . Vrijednost unutarnjih dobitaka od ljudi i uređaja zadana je prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade HRN EN ISO 13790 [6] koji kao tipičnu vrijednost za stambene prostore definira  $5 \text{ W/m}^2$  ploštine korisne površine. Za svaki stan zadana je postavna temperatura od  $20^\circ\text{C}$  u režimu grijanja i  $22^\circ\text{C}$  u režimu hlađenja, također, prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade HRN EN ISO 13790 [6]. U svrhu postizanja definiranih postavnih temperatura snaga ogrjevnih i rashladnih tijela zadana je kao beskonačna. Pretpostavljeno je da se postavna temperatura održava 06:00 – 22:00, sedam dana u tjednu, dok je ostatak vremena sustav grijanja i hlađenja isključen.

### 3. Matematički model višezonske zgrade u TRNSYS-u

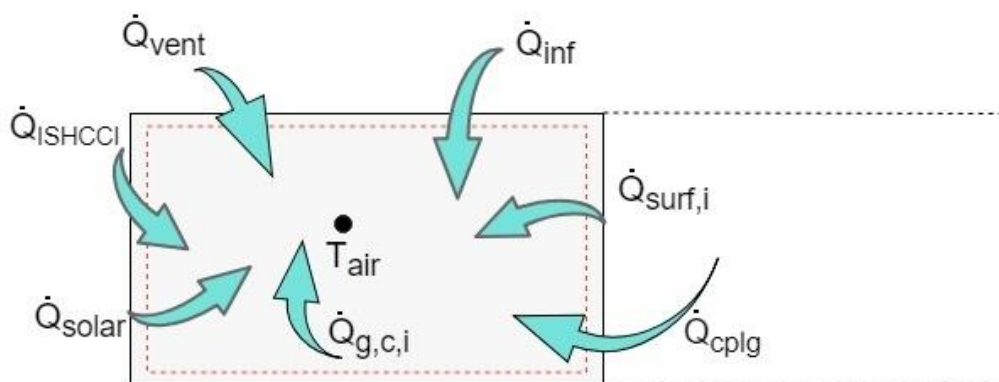
TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation program) je računalni program koji na osnovu ulaznih podataka, i međuovisnosti simulacijskih komponenti, postavlja energijske bilance sustava. Koristi se za simulaciju rada dinamičkih energijskih sustava te se sastoji od 2 dijela:

- procesora koji čita i obrađuje ulazne podatke, iterativno rješava sustav jednačbi, određuje konvergenciju rješenja te prikazuje izlazne podatke, te
- velike baze komponenata od kojih svaka modelira ponašanje dijela sustava.

Koristi se za analizu energijskih sustava, od jednostavnih toplovodnih sustava do konstruiranja i simulacija zgrada i popratne opreme, uključujući strategije upravljanja, ponašanje i navike korisnika, alternativne sustave energije (vjetar, solarni, fotonaponski) i slično. Korisničko sučelje programa sastoji se od glavnog korisničkog sučelja Simulation Studio-a, te dodatnih paketa korisničkih sučelja za specifične namjene. Jedan od dodatnih sučelja je TRNBuild koji olakšava modeliranje višezonske zgrade na način da omogućuje definiranje svih potrebnih ulaznih podataka za simulaciju toplinskog odziva zgrade, kao što su geometrijska i termodinamička svojstva ovojnice, raspored i intenzitet unutarnjih toplinskih dobitaka od ljudi, rasvjete i opreme, raspored grijanja, hlađenja i ventilacije, uvjeti toplinske ugodnosti i slično [5].

Komponenta TRNSYS-a koja omogućava simulaciju nestacionarnih toplinskih tokova unutar višezonske zgrade je Type 56. Spomenuta komponenta se temelji na modelu energijskih bilanci koje se postavljaju za volumen zraka svake pojedine zone te površina koje definiraju toplinsku zonu. Unutar komponente nalaze se svi ulazni i izlazni podaci te parametri potrebni za simulaciju dinamičkog temperaturnog odziva zgrade. Za bolje razumijevanje TRNSYS-a i provedene analize osjetljivosti na modelu, osnovne jednačbe energijske ravnoteže i toplinskih tokova svake pojedine zone prikazane su u nastavku [5].

Matematičkim modelom određena je toplinska ravnoteža modela za jedan zračni čvor po zoni, uključujući i toplinski kapacitet zraka u zoni te sve kapacitete koji su usko vezani sa tom zonom, kao na primjer namještaj. Toplinska ravnoteža konvektivnih dobitaka unutar jedne zone prikazana je Slikom 4.



Slika 4 Toplinska ravnoteža konvektivnih dobitaka unutar jedne zone

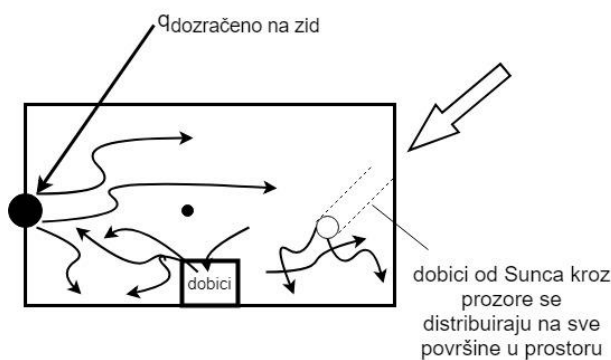
Ravnoteža konvektivnih tokova topline prikazana je sljedećom jednačbom:

$$Q_i = Q_{surf,i} + Q_{inf,i} + Q_{vent,i} + Q_{g,c,i} + Q_{cplg,i} + Q_{solar,i} + Q_{ISHCCI,i} \quad (1)$$

gdje su:

$Q_{surf,i}$	toplinski tok između površine i zraka	[W]
$Q_{inf,i}$	toplinski tok uslijed infiltracije	[W]
$Q_{vent,i}$	toplinski tok uslijed ventilacije	[W]
$Q_{g,c,i}$	unutarnji dobiti (ljudi, rasvjeta, oprema, radijatori)	[W]
$Q_{cplg,i}$	toplinski tok od drugih zona	[W]
$Q_{solar,i}$	dobici od Sunca kroz prozore	[W]
$Q_{ISHCCI,i}$	apsorbirano Sunčevo zračenje unutarnjih zasjenjenja	[W]

Slika 5 prikazuju izmjenu topline uslijed zračenja zida koja se odvija između ploha unutar zone.



Slika 5 Izmjena topline zračenjem unutar jedne zone za jedan zid i njegovu temperaturu površine

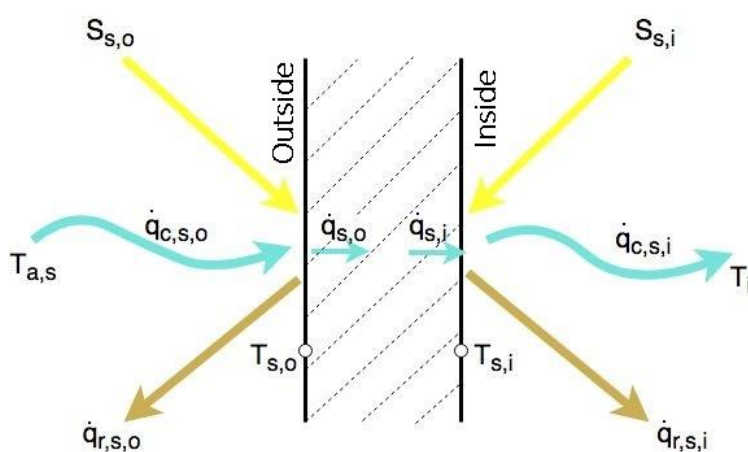
Toplinski tok uslijed zračenja opisan je jednačbom 2:

$$Q_{r,wi} = Q_{g,r,i,wi} + Q_{sol,wi} + Q_{long,wi} + Q_{wall\_gain} \quad (2)$$

gdje su:

$Q_{r,wi}$	ukupni dobici i gubici zračenjem površinskog čvora zida	[W]
$Q_{g,r,i,wi}$	unutarnji dobici zračenjem prema zidu	[W]
$Q_{sol,wi}$	dobici od Sunca kroz prozore prema zidu	[W]
$Q_{long,wi}$	izmjena dugovalnog zračenja između zidova i prozora	[W]
$Q_{wall\_gain}$	toplinski tok prema površini zida ili prozora (zadaje korisnik)	[W]

Toplinski tok i temperature koji karakteriziraju izmjenu topline između zone i vanjskog okoliša odvijaju se konvekcijom, provođenjem i zračenjem preko vanjskog zida što je prikazano na Slici 6.



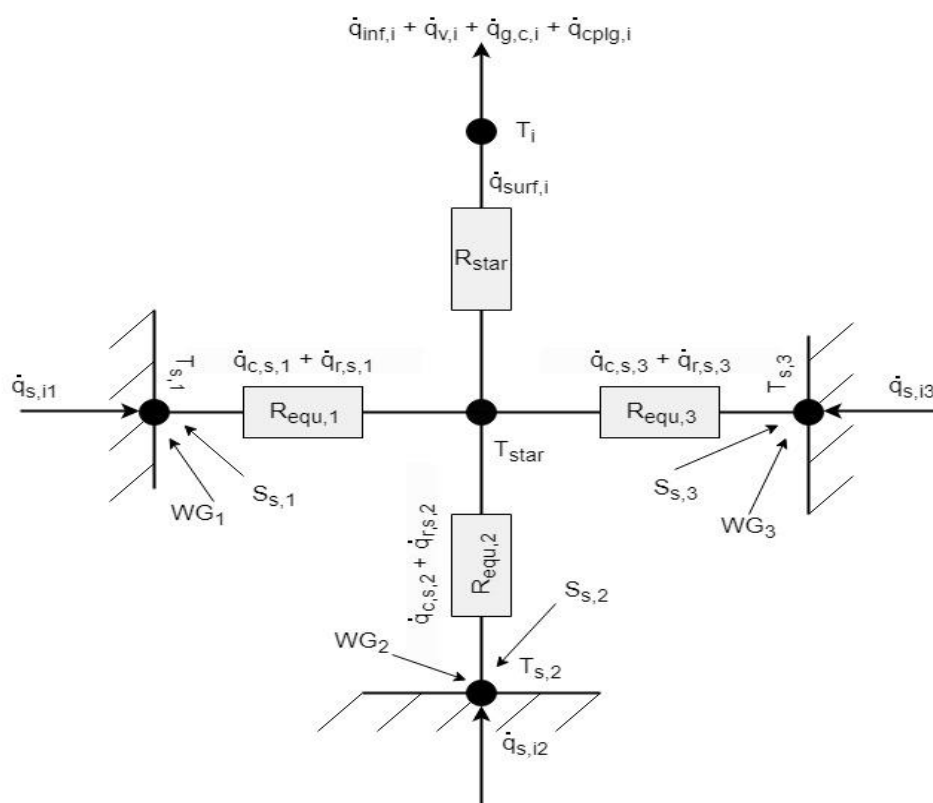
Slika 6 Toplinski tok kroz vanjske zidove

$S_{s,i}$	toplinski tok zračenjem apsorbiran na unutarnjoj površini zida (dobici od Sunca i dobici dugovalnim zračenjem)	[W/m <sup>2</sup> ]
$S_{s,o}$	toplinski tok zračenjem apsorbiran na vanjskoj površini zida (dobici od Sunca)	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_{r,s,i}$	izmjena topline zračenjem sa svim površinama unutar zone	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_{r,s,o}$	izmjena topline zračenjem sa svim površinama izvan zone	[W/m <sup>2</sup> ]
$q_{w,g,i}$	toplinski tok definiran od strane korisnika	[W/m <sup>2</sup> ]

$q_{s,i}$	toplinski tok uslijed provođenja od unutrašnjosti zida prema unutarnjoj površini zida	$[W/m^2]$
$q_{s,0}$	toplinski tok provođenja od vanjske površine zida prema unutrašnjosti zida	$[W/m^2]$
$q_{c,s,i}$	toplinski tok uslijed konvekcije s unutarnje površine zida prema prostoriji	$[W/m^2]$
$q_{c,s,0}$	toplinski tok uslijed konvekcije s okoliša prema vanjskoj površini zida	$[W/m^2]$
$T_{s,i}$	temperatura unutarnje površine zida	$[K]$
$T_{s,0}$	temperatura vanjske površine zida	$[K]$

Kako bi se opisale nestacionarne pojave, a koje se u općem obliku opisuju diferencijalnom jednačbom, koristi se pojednostavljeno, linearizirano rješenje diferencijalne jednačbe u obliku prijenosne funkcije za svaku plohu. Prijenosna funkcija opisuje takozvanu toplinsku povijest zidova, gdje se zidovi smatraju crnim tijelima. Pri tome broj prošlih vremenskih koraka (sati) koji se uzimaju u obzir pri izračunu promatranog vremenskog trenutka ovisi o masivnosti pojedine zgrade, pri čemu se za zgrade s većom akumulacijskom masom u obzir uzima veći broj prošlih vremenskih koraka (uslijed veće inercije ovojnice zgrade).

Dugovalno zračenje između ploha koje omeđuju zonu i konvektivni toplinski tok s okolnih ploha na zračni čvor koji ispunjava zonu pojednostavljeni su korištenjem *star network* modela. Spomenuti model koristi izmišljen temperaturni čvor,  $T_{star}$ , radi istovremenog uzimanja u obzir toplinskog toka koji je predan s površine konvekcijom zraku te toplinskog toka koji je predan zračenjem ostalim zidovima i prozorima. Korištena literatura [5] navodi da se *star network* model pokazao točnijim u odnosu na korištenje kombiniranog koeficijenta prijelaza topline. Slika 7 prikazuje *star network* model s tri plohe.



Slika 7 Shema star network modela zone s tri plohe

Na Slici 7 su:

$\dot{q}_{c,s,i}$	konvektivni toplinski tok s plohe na unutarnji zrak	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}_{c,s,o}$	konvektivni toplinski tok prema plohi iz okoliša	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}_{r,s,i}$	toplinski tok predan zračenjem s plohe na unutarnji zrak	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}_{r,s,o}$	toplinski tok predan zračenjem plohi iz okoliša	[W/m <sup>2</sup> ]
$T_{STAR}$	fiktivna temperatura star network modela	[K]
$T_{s,i}$	temperatura unutarnje površine zida	[K]
$T_{s,o}$	temperatura vanjske površine zida	[K]
$R_{equ,i}$	ekvivalentni otpor	[K/W]
$R_{STAR}$	ekvivalentni otpor star network modela	[K/W]

Star network model prikazan Slikom 7 opisuju jednađbe u nastavku. Jednađba (3) prikazuje ukupni toplinski tok koji je predan konvekcijom i zračenjem s unutarnje plohe:

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \dot{q}_{c,s,i} + \dot{q}_{r,s,i} \quad (3)$$

Jednadžba (4) prikazuje drugi način zapisa jednadžbe (3):

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \frac{1}{R_{equ,i} \cdot A_{s,i}} (T_{s,i} + T_{STAR}) \quad (4)$$

gdje je:

$A_{s,i}$                       površina unutarnje plohe                      [m<sup>2</sup>]

Ukupni toplinski tok predan konvekcijom i zračenjem s okoliša na vanjsku plohu prikazan je jednadžbom (5):

$$\dot{q}_{comb,s,o} = \dot{q}_{c,s,o} + \dot{q}_{r,s,o} \quad (5)$$

Jednadžba (6) prikazuje konvektivni toplinski tok iz jednadžbe (5), a jednadžba (7) toplinski tok predan zračenjem:

$$\dot{q}_{c,s,o} = h_{conv,s,o} (T_{a,s} + T_{s,o}) \quad (6)$$

$$\dot{q}_{r,s,o} = \sigma \cdot \varepsilon_{s,o} (T_{s,o}^4 + T_{sky}^4) \quad (7)$$

gdje su:

$h_{conv,s,o}$	koeficijent prijelaza topline konvekcijom prema okolišu	[W]
$T_{a,s}$	temperatura okoliša	[K]
$T_{s,o}$	temperatura vanjske površine zida	[K]
$\sigma$	Stephan-Boltzmannova konstanta	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )]
$\varepsilon_{s,o}$	emisijski faktor dugovalnog zračenja vanjske plohe	[-]
$T_{sky}$	fiktivna temperatura neba	[K].



Fiktivna temperatura neba računa se prema jednadžbi (8):

$$T_{sky} = (1 - f_{sky}) \cdot T_{a,s} + f_{sky} \cdot T_{sky} \quad (8)$$

gdje je:

$f_{sky}$  faktor vidljivosti neba [-].

Energijske bilance na površinama opisane su jednadžbama (9) i (10):

$$\dot{q}_{s,i} = \dot{q}_{comb,s,i} + S_{s,i} + \text{dobitak zida} \quad (9)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \dot{q}_{comb,s,o} + S_{s,o} \quad (10)$$

Za unutarnje plohe  $S_{s,i}$  može predstavljati dobitke od Sunca i/ili dugovalno zračenje predano unutarnjim izvorima topline. Dobitak zida je korisnički odabran toplinski tok prema središtu zida koji može opisivati promjenjive dobitke od Sunca ili se može koristiti kao pojednostavljeni način simuliranja površinskog grijanja ili hlađenja. Za vanjske zidove  $S_{s,o}$  se sastoji samo od Sunčevog toplinskog zračenja.

S obzirom na uvjete odabrane za pojedini zid prema *star network* modelu, TRNSYS razlikuje četiri kategorije zida, kako slijedi:

- external (vanjski zid),
- internal (zid unutar zone),
- adjacent (zid koji graniči s drugom zonom),
- boundary (zid s rubnim uvjetima).

#### 4. Referentni energijski model *Mamutice* u TRNSYS-u

Pri izradi energijskog modela potrebno je korištenjem korisničkog sučelja TRNBuild definirati toplinske zone te ulazne parametre na temelju kojih TRNSYS komponenta Type 56 postavlja energijske bilance i daje konačne rezultate simulacije. U prvom koraku definirana je Zemljina polutka te orijentacija površina (zid, strop, pod, prozori,...). Potom je izvršeno zoniranje objekta, pri čemu je zoniranje izvršeno na način da svaka toplinska zona predstavlja jedan stan, te da su hodnik i strojarnica zasebne zone. Model osmog ulaza *Mamutice* stoga se sastoji od 130 zona (128 stanova, strojarnica i hodnik<sup>2</sup>). Za svaku navedenu zonu definiran je volumen, orijentacija te geometrijska i termodinamička svojstva zidova i prozora. Analizirani ulaz *Mamutice* sa sjeverne i južne strane graniči s drugim ulazima, a budući da se radi o grijanim zonama, pretpostavljeno je da se izmjena topline kroz navedene strane može zanemariti. Stoga su zidovi koji graniče s drugim ulazima u TRNBuildu definirani kao BOUNDARY plohe prema opisanom *star network* modelu u prethodnom poglavlju. Pri tome se za BOUNDARY plohu pretpostavlja adijabatski rubni uvjet (nema izmjene topline) na sredini debljine zida. U prizemlju osmog ulaza *Mamutice* nalaze se poslovni prostori za koje podaci nisu bili dostupni. S obzirom da se također radi o grijanim zonama, pretpostavljeno je da se izmjena topline između prvoga kata i prizemlja može zanemariti te je pod prvog kata također definiran kao BOUNDARY ploha. Sastav zidova definiran je u TRNSYS-u prema Tablici 2, dok je prozor izabran iz unaprijed definirane baze podataka prema U i g vrijednostima koje najviše odgovaraju onima iz projektne dokumentacije.

Kao što je već prije navedeno u Poglavlju 2, za svaku zonu definirana je postavna temperatura od 20 °C u režimu grijanja i 22 °C u režimu hlađenja prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade HRN EN ISO 13790 [6]. U svrhu postizanja postavnih temperatura snaga ogrjevnih i rashladnih tijela zadana je kao beskonačna. Pretpostavljeno je da se postavna temperatura održava 06:00 – 22:00, sedam dana u tjednu, dok je ostatak vremena sustav grijanja i hlađenja isključen. Za svaku zonu je također definirana infiltracija, a koja prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade HRN EN ISO 13790 [6] za stambene zgrade iznosi 0,5 h<sup>-1</sup>. Prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade HRN EN ISO 13790 definirana je i vrijednost unutarnjih toplinskih dobitaka od ljudi i uređaja [6], a iznosi 5 W/m<sup>2</sup> ploštine korisne

---

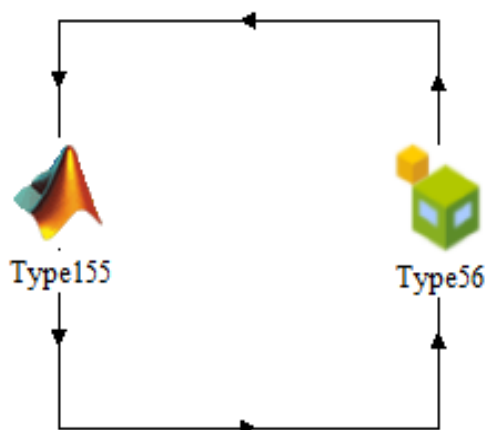
<sup>2</sup> Hodnici na svim katovima modelirani su kao jedna zona

površine za stambene zgrade. Navedeni ulazni parametri definirani su u programskom jeziku MATLAB te su povezani sa Type 56. Ukupan broj ulaznih parametara potreban za modeliranje osmog ulaza stambene zgrade *Mamutica* prikazan je Tablicom 3.

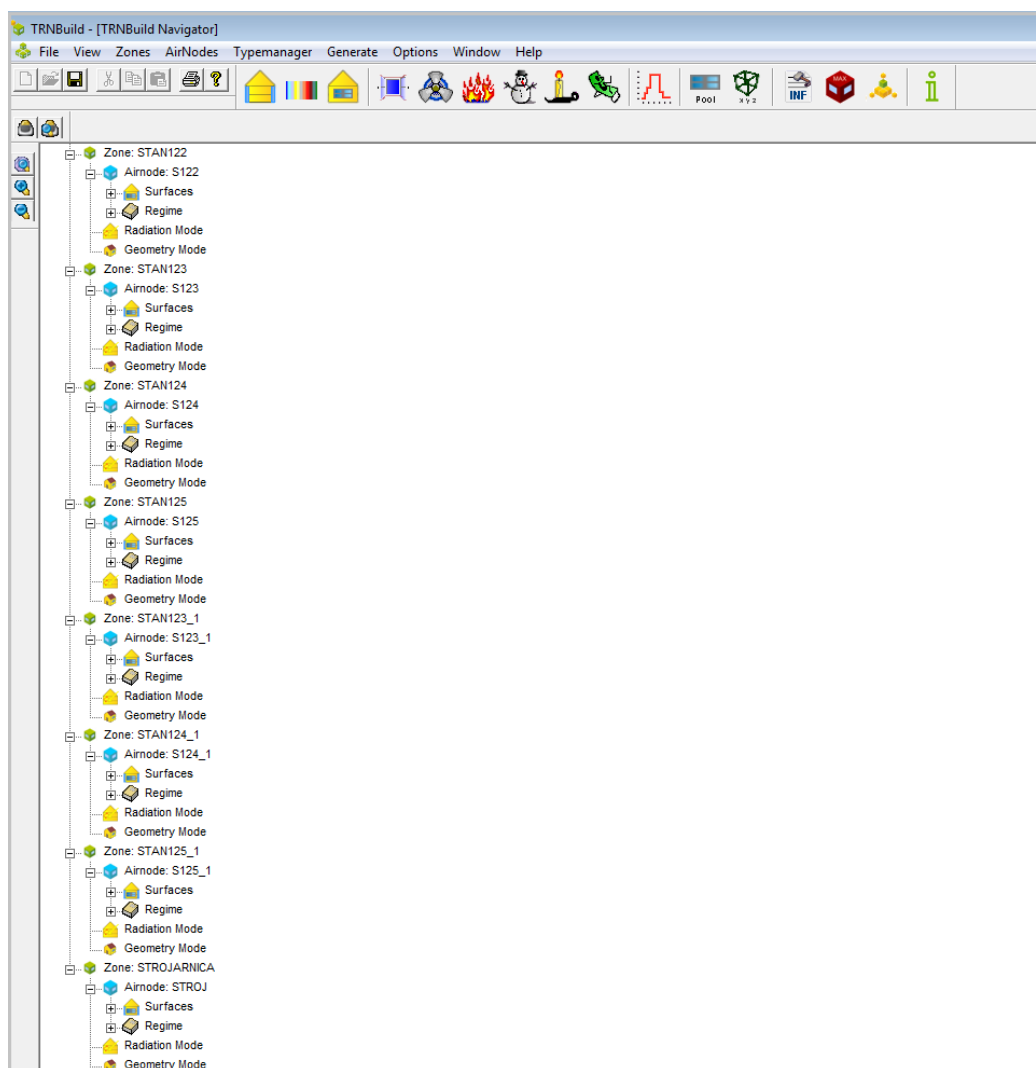
*Tablica 3 Ulazni parametri modela zgrade*

<b>Vrsta podataka</b>	<b>Broj podataka</b>
Meteorološki podaci	22
Infiltracija	130
Postavna temperatura za grijanje	130
Snaga ogrjevnih tijela	130
Postavna temperatura za hlađenje	130
Snaga rashladnih tijela	130
Unutarnji toplinski dobici	130
UKUPNO	802

Prema Tablici 3 mogu se uočiti dvije vrste ulaznih podataka, meteorološki podaci za odabranu lokaciju (grad Zagreb) za svaki sat u godini te ulazni podaci koji su definirani za svaku pojedinu zonu, također za svaki sat u godini. Meteorološki podaci za odabranu lokaciju uključuju temperaturu neba, temperaturu tla, temperaturu zraka, relativnu vlažnost zraka, globalno Sunčevo zračenje na horizontalne i vertikalne plohe te difuzno Sunčevo zračenje na horizontalne plohe. Za izlazne podatke definirani su toplina potrebna za grijanje i hlađenje te temperatura zraka prostorije, oboje kao satne vrijednosti. U svrhu lakše promjene ulaznih i analize izlaznih podataka, korišten je računalni program MATLAB povezan s komponentom višezonske zgrade (Type 56) preko TRNSYS komponente Type 155 i kodom definiranim u MATLAB-u. Nakon pokretanja glavne simulacije koja je prikazana Slikom 8, dobiveni su izlazni parametri koji su obrađeni u MATLAB-u. Pri tome model višezonske zgrade, koji je prikazan Slikom 9, učitava ulazne podatke iz MATLAB-a (meteorološki podaci, infiltracija, postavna temperatura za grijanje i hlađenje, snaga potrebna za grijanje i hlađenje te unutarnji toplinski dobici), iterativno rješava sustav energijskih bilanci, određuje da li je rješenje konvergiralo te izlazne podatke ispisuje u podatkovnu datoteku korištenjem MATLAB-a.



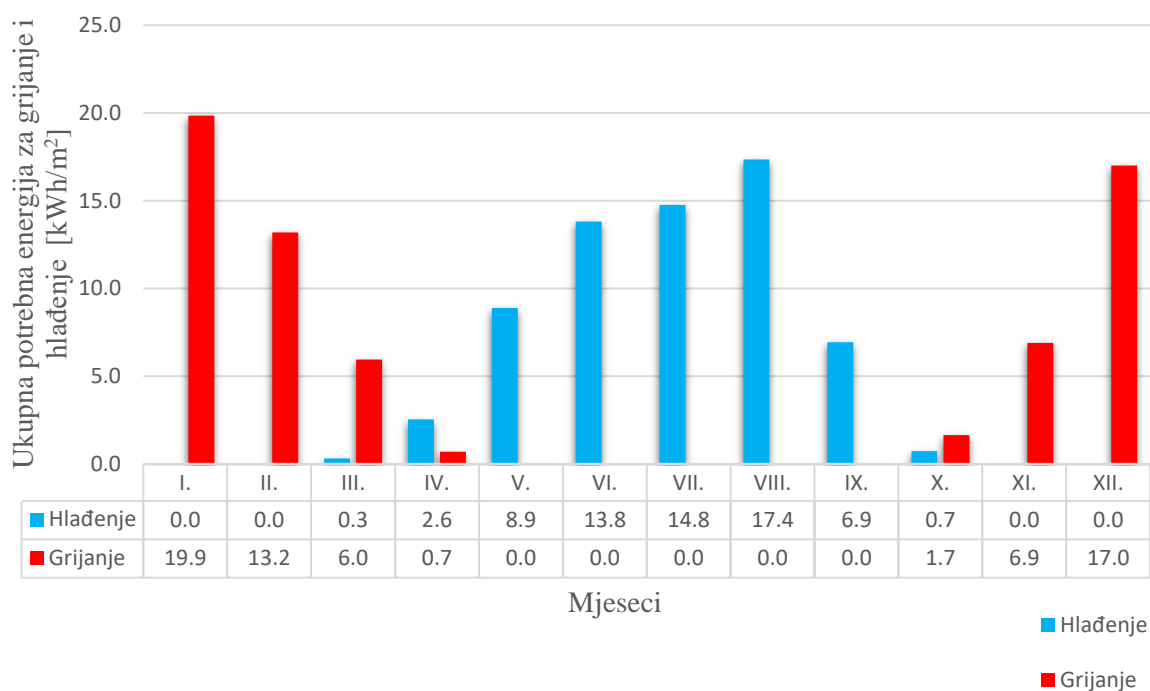
Slika 8 Prikaz glavnog simulacijskog modela u korisničkom sučelju Simulation Studio



Slika 9 Prikaz modela višezonske zgrade u pomoćnom korisničkom sučelju TRNBuild

#### 4.1. Analiza rezultata simulacije referentnog modela

Provođenjem simulacije dobiveni su izlazni podaci o potrebnim energijama za grijanje i hlađenje za svaku zonu i svaki sat za tipičnu meteorološku godinu u gradu Zagrebu. Ukupna godišnja potrebna energija analiziranog osmog ulaza *Mamutice* iznosi 538.238 kWh (65,3 kWh/m<sup>2</sup>) za grijanje te 538.907 kWh (65,4 kWh/m<sup>2</sup>) za hlađenje, što rezultira ukupnom godišnjom potrebnom energijom od 1.077.146 kWh (130,7 kWh/m<sup>2</sup>). Na Slici 10 prikazana je potrebna energija za grijanje i hlađenje po mjesecima.



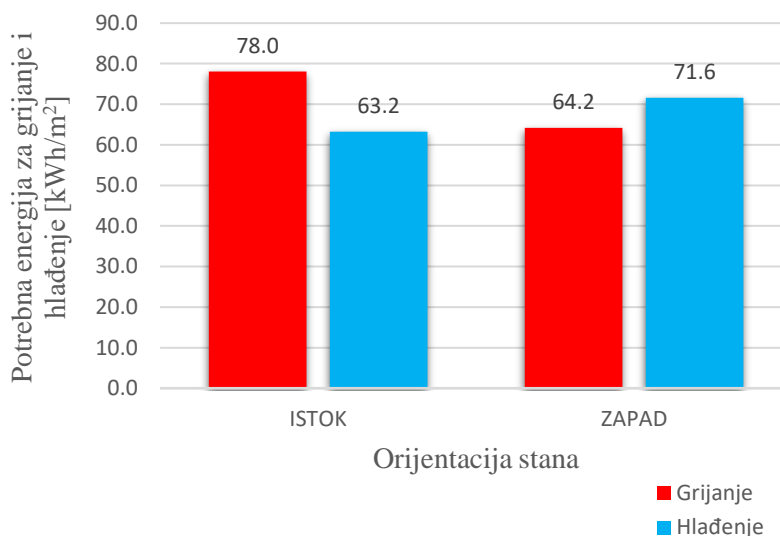
Slika 10 Mjesečna potrebna energija za grijanje i hlađenje referentnog modela *Mamutice*

U Tablici 4 prikazane su potrebna energija za grijanje i hlađenje na svakom katu iz čega se može se uočiti kako nema značajnih odstupanja u potrebama za grijanje i hlađenje između pojedinih katova. Iznimka su stanovi na zadnjem katu gdje je razlog odstupanja u odnosu na ostale stanove ravni krov izložen atmosferskim utjecajima. Također, stanovi na 19. katu imaju više vanjskih zidova u odnosu na ostale stanove.

Tablica 4 Potrebna energija za grijanje i hlađenje po katovima

Kat	Površina [m <sup>2</sup> ]	Potrebna energija za grijanje [kWh/m <sup>2</sup> ]	Potrebna energija za hlađenje [kWh/m <sup>2</sup> ]
I.	440	61,3	66,3
II.	440	64,9	65,5
III.	440	64,6	65,5
IV.	440	64,6	65,4
V.	440	64,6	65,4
VI.	440	64,6	65,4
VII.	440	64,6	65,4
VIII.	440	64,6	65,5
IX.	440	64,6	65,5
X.	440	64,5	65,6
XI.	450,6	63,0	65,1
XII.	450,6	62,3	64,7
XIII.	450,6	60,9	66,1
XIV.	450,6	62,2	64,7
XV.	450,6	62,8	64,6
XVI.	450,6	65,2	65,1
XVII.	440	74,6	69,9
XVIII.	365,4	91,1	78,7
XIX.	170,7	114,9	88,1

Na Slici 11 prikazan je utjecaj orijentacije stana na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Analizirani su stan na istočnoj strani i stan na zapadnoj strani na istom katu zgrade (stan 1 i stan 3 na Slici 3). Potrebna energija za grijanje stana na istočnoj strani je 21,5% veća od stana koji se nalazi na zapadnoj strani, dok je potrebna energija za hlađenje 11,7% manja.



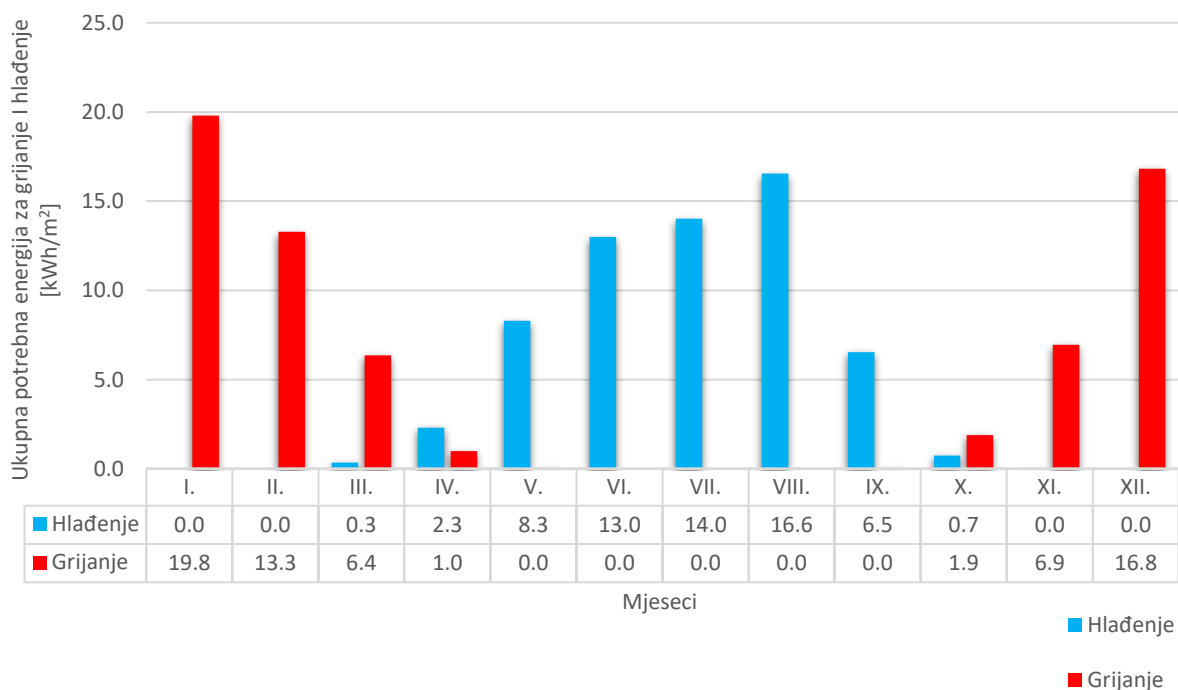
*Slika 11 Potrebna energija za grijanje i hlađenje istočno i zapadno orijentiranog stana na istom katu*

#### 4.2. Analiza rezultata simulacije modela karakterističnog kata

Kao što je već ranije opisano i prikazano u Tablici 4, rezultati provedene simulacije ne pokazuju značajne razlike među katovima. Osim toga, računalno vrijeme za provođenje simulacije igra značajnu ulogu kod provođenja analize osjetljivosti, koje za simulaciju cijele zgrade, odnosno 130 zona iznosi približno 45 minuta, dok za jedan kat iznosi približno 1 minutu. Spomenute simulacije provedene su na modelu računala HP ProDesk 490 G1 MT, sa sljedećim karakteristikama procesora: Intel Core i7-4770 CPU, 3.40 GHz. Soga su sve daljnje analize provedene na primjeru karakterističnog kata (X. kat). Provođenjem energijske simulacije za X. kat kao karakteristični kat dobiveni su izlazni podaci o satnim potrebnim energijama za grijanje i hlađenje za svaku zonu za tipičnu meteorološku godinu u gradu Zagrebu, pri čemu su korišteni isti ulazni podaci kao i za referentni model. Ukupna godišnja potrebna energija analiziranog kata iznosi 66,2 kWh/m<sup>2</sup> za grijanje te 61,8 kWh/m<sup>2</sup> za hlađenje, što rezultira ukupnom potrebnom energijom od 128 kWh/m<sup>2</sup>. Usporedba rezultata modela karakterističnog kata i referentnog modela prikazana je Tablicom 5, dok Slika 12 prikazuje mjesečnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje karakterističnog kata.

Tablica 5 Usporedba rezultata modela karakterističnog kata i referentnog modela

	Potrebna energija za grijanje	Potrebna energija za hlađenje	Ukupna potrebna energija
<b>Karakteristični kat</b> [kWh/m <sup>2</sup> ]	66,2	61,8	128
<b>OSMI ULAZ</b> [kWh/m <sup>2</sup> ]	65,3	65,4	130,7
<b>ODSTUPANJE</b> [kWh/m <sup>2</sup> ]	0,9	-3,6	-2,7
<b>ODSTUPANJE</b> [%]	1,37	-5,5	-2,1



Slika 12 Mjesečna potrebna energija za grijanje i hlađenje karakterističnog kata



Iz rezultata dobivenih provođenjem energijske simulacije na karakterističnom katu može se uočiti kako nema značajnih odstupanja za potrebama za grijanje i hlađenje karakterističnog kata u odnosu na referentni model osmog ulaza. Iz tog razloga su daljnje analize osjetljivosti provedene korištenjem karakterističnog kata, a u cilju rangiranja utjecajnih parametara na konačan rezultat, odnosno potrošnju energije za grijanje i hlađenje.

## 5. Opis analize osjetljivosti

Napredak računalnih tehnologija, numerički pristup, inženjerstvo i znanost su područja koja su doživjela veliki rast u korištenju sofisticiranih računalnih modela za pomoć znanstvenim istraživanjima, inženjerskoj analizi i konstrukciji. Upravo u navedenim područjima analiza osjetljivosti igra važnu ulogu u donošenju ispravnih odluka, a predstavlja formalizirani postupak za identifikaciju učinka promjena u različitim komponentama modela na rezultat modela. Drugim riječima, to je tehnika sistematske promjene ulaznih veličina modela u cilju analiziranja posljedica takvih promjena. Koristi se kao potpora u donošenju odluka ili za izradu preporuka donositeljima odluka, za poboljšanje razumijevanja sustava te za poboljšanje modela. Osim toga, pruža mogućnost rangiranja ulaznih varijabli prema utjecaju na varijaciju izlaznih varijabli što rezultira učinkovitijom analizom i implementacijom boljeg konačnog rješenja [7]. Analiza osjetljivosti je stoga ključna metoda prilikom energijskih analiza zgrada u cilju rangiranja utjecajnih parametara na konačan rezultat.

Analiza osjetljivosti energijskih simulacija stambene zgrade provodi se za različite namjene. Na primjer, u slučaju izgradnje novih stambenih zgrada analizom osjetljivosti moguće je utvrditi najutjecajnije čimbenike koji utječu na povećanje, odnosno smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje te se korištenjem dobivenih rezultata može odabrati optimalno rješenje iz raspoloživog skupa alternativa. Kod analize postojećih zgrada analiza osjetljivosti može dati prikaz utjecaja promjene ulaznih parametara na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje, na osnovu kojih se može vidjeti koliko greška u procjeni pojedinih ulaznih parametara utječe na procjenu potrebne energije. Također, na temelju dobivenih rezultata može se zaključiti koliko implementacija određenih mjera utječe na konačan rezultat u cilju uštede energije i povećanja energetske učinkovitosti. Analiza osjetljivosti energijskih simulacija osmog ulaza *Mamutice*, provedena je s ciljem pronalaska najutjecajnijih parametara na promjenu potrebne energije za grijanje i hlađenje. Rezultati provedene analize osjetljivosti daju egzaktnu vrijednost utjecaja krive pretpostavke svakog od analiziranog parametra na konačan rezultat, pri čemu se parametri koji nemaju ili imaju zanemariv utjecaj na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje mogu zanemariti prilikom analize sličnih zgrada (sličnih na temelju građevinskih karakteristika, namjene i meteoroloških uvjeta na lokaciji zgrade).

Tipičan dijagram toka koji opisuje strukturirani proces analize osjetljivosti prikazan je Slikom 13. Prvi korak je određivanje raspona ulaznog parametra, pri čemu je širina odabranog

raspona ulaznih varijabli od vrlo velike važnosti. Na primjer, ako varijabla A ima mali utjecaj na izlazne vrijednosti, a varijabla B ima veliki utjecaj, ali raspon varijacija varijable A je širok dok je raspon varijable B uzak, zaključak analize osjetljivosti može dati dojam da je varijabla A utjecajnija. Stoga, bitno je odabrati raspon dovoljno širok kako bi se analizirale sve moguće opcije, ali ne šire od toga. Drugi korak odnosi se na stvaranje energijskih modela zgrade na temelju definiranih ulaznih raspona. Nakon završetka energijske simulacije, sljedeća dva koraka su obrada i analiza rezultata simulacije. Posljednji korak predstavlja vizualizacija rezultata dobivenih analizom osjetljivosti [8].



*Slika 13 Dijagram toka strukturiranog procesa analize osjetljivosti [9]*

Pri analizi osjetljivosti razlikuju se globalna i lokalna metoda. Globalna analiza osjetljivosti uzima u obzir varijacije višestrukih varijabli, odnosno njihovo međudjelovanje, dok lokalna analiza osjetljivosti u obzir uzima varijaciju samo jednog parametra. Prilikom provedbe lokalne

analize osjetljivosti specifični ulazni podaci zgrade su isti tijekom cijele simulacije, osim parametra čija se promjena analizira, a razlika u rezultatima simulacije uzorkovana je isključivo promjenom tog ulaznog parametra. Prednosti lokalne analize osjetljivosti su niski troškovi računanja, jednostavna implementacija, lako tumačenje rezultata. Međutim, ova metoda ne uzima u obzir međuovisnosti između ulaznih podataka te nema mogućnost samoprovjere, što predstavlja njene nedostatke. Prednosti globalne analize osjetljivosti ovise o korištenim metodama, a najčešće korištene metode globalne analize osjetljivosti u provedbi energijskih analiza zgrada i njihove prednosti opisane su u [9]. Globalna analiza osjetljivosti, kao što je već prije spomenuto, uzima u obzir varijacije i međuovisnost varijabli, što predstavlja osnovnu prednost ove metode. U okviru ovoga rada provedena je lokalna analiza osjetljivosti koja je detaljnije opisana u Poglavlju 5.1.

### 5.1. Lokalna analiza osjetljivosti

Prije provedbe analize osjetljivosti od velikog značaja je određivanje ulaznih parametara koji će biti analizirani, a utjecaj svakog pojedinog parametra može se iskazati koeficijentom utjecajnosti koji se računa u dva različita oblika. Najjednostavniji oblik računanja koeficijenta utjecajnosti prikazan je jednadžbom (11):

$$IC = \frac{\text{promjena izlazne vrijednosti}}{\text{promjena ulazne vrijednosti}} = \frac{\Delta OP}{\Delta IP} = \frac{OP_1 - OP_2}{IP_1 - IP_2}. \quad (11)$$

Drugi oblik računanja koeficijenta utjecajnosti uzima u obzir referentne vrijednosti kako bi osjetljivost bila izražena u postotku promjene što je opisano jednadžbom (12):

$$IC = \frac{OP - OP_{BC}}{OP_{BC}} / \frac{IP - IP_{BC}}{IP_{BC}} \quad (12)$$

Kratice u jednadžbama (11) i (12) predstavljaju sljedeće:

$OP$	vrijednost izlaznog parametra
$IP$	vrijednost ulaznog parametra
$OP_{BC}$	vrijednost izlaznog parametra za referentni model

$IP_{BC}$	vrijednost ulaznog parametra za referentni model
IC	bezdimenzijski koeficijent utjecajnosti koji predstavlja postotak promjene izlazne vrijednosti zbog postotka perturbacije ulazne vrijednosti.

Za provedbu lokalne analize osjetljivosti analizirane zgrade *Mamutica* u obzir su uzete referentne vrijednosti, a osjetljivost je prikazana u postotku promjene prema Jednadžbi 12, prvenstveno radi bolje vizualizacije rezultata. Dodatno, tablično su prikazane apsolutne vrijednosti promjene variranih ulaznih parametara u odnosu na referentni model te pripadajuća potrebna energija za grijanje i hlađenje svakog od variranih ulaznih parametara. Simulacijski modeli zgrade sastoje se od brojnih ulaznih parametara, pri čemu su u svrhu analize osjetljivosti svi ulazni podaci zgrade isti tijekom cijele simulacije, osim parametra čija se promjena analizira. Stoga se može zaključiti da je razlika u rezultatima simulacije uzrokovana isključivo promjenom tog ulaznog parametra [10].

## 6. Analiza osjetljivosti energijskog modela *Mamutice*

Kao što je već prije spomenuto, analiza osjetljivosti odnosi se na promjenu ulaznih veličina u cilju analiziranja upravo tih promjena na konačan rezultat. U okviru ovoga rada, analiza osjetljivosti provedena je na primjeru karakterističnog kata osmog ulaza *Mamutice* za određivanje potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene sljedećih ulaznih podataka:

- infiltracije,
- unutarnjih toplinskih dobitaka,
- U-vrijednosti zida,
- toplinskog kapaciteta zida,
- postavne temperature za grijanje i
- postavne temperature za hlađenje.

Raspon promjena ulaznih podataka te utjecaj tih promjena na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje, za svaki pojedini ulazni podatak opisan je u nastavku. U okviru ovoga rada nisu analizirane promjene U-vrijednosti prozora i g-vrijednosti prozora s obzirom da su U-vrijednost prozora i g-vrijednost prozora međusobno zavisne varijable, odnosno promjena U-vrijednosti u programskom paketu TRNSYS uzrokuje promjenu g-vrijednosti. Spomenuta analiza izlazi iz okvira lokalne analize osjetljivosti te je za navedeni slučaj potrebno primijeniti jednu od metoda globalne analize osjetljivosti. S obzirom da nije analizirana promjena g-vrijednosti prozora, utjecaj promjene dobitaka od Sunca na pojedinu toplinsku zonu nije vidljiv. Međutim, može se zaključiti da bi utjecaj g-vrijednosti prozora bio vrlo sličan utjecaju unutarnjih toplinskih dobitaka na ukupnu potrebnu energiju, dok bi utjecaj U-vrijednosti prozora bio vrlo sličan utjecaju U-vrijednosti zida na ukupnu potrebnu energiju.

### 6.1. Utjecaj infiltracije

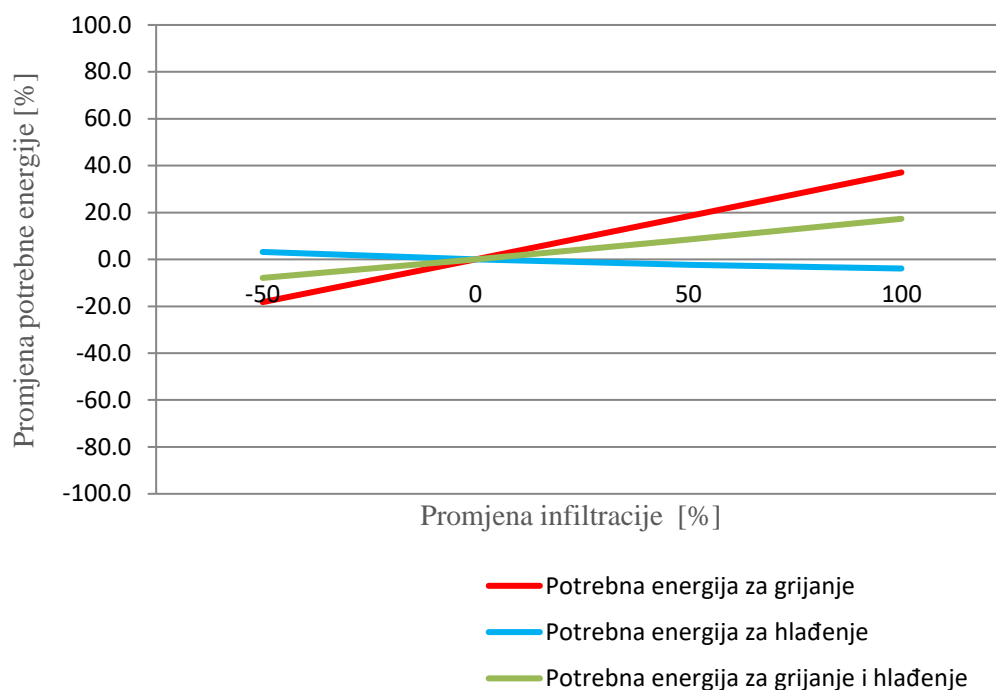
Infiltracija zraka u zgradama ovisi o brojim parametrima, kao što su razlika tlaka unutar i izvan zgrade, lokacija zgrade, smjer i brzina puhanja vjetrova, veličina i orijentacija zgrade, stupanj propusnosti prozora i vrata, i slično. Prema odredbi u Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, broj izmjena unutarnjeg zraka s vanjskim zrakom kod zgrade u kojoj borave ljudi mora biti najmanje  $0,5 \text{ h}^{-1}$  [4]. Stoga je za referentni model karakterističnog kata definirana spomenuta vrijednost infiltracije od  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . Također je propisano

da u vrijeme kada ljudi ne borave u dijelu zgrade koji je namijenjen za rad i/ili boravak ljudi, potrebno osigurati izmjenu unutarnjeg zraka od najmanje  $0,2 \text{ h}^{-1}$ . Osim toga, za karakteristični kat je pretpostavljena i mogućnost da spojevi između komponenata nisu dobro zabrtvljeni (lošija stolarija), za što je pretpostavljen potreban broj izmjena zraka vrijednosti od  $1 \text{ h}^{-1}$ . Radi navedenih razloga, varirane su izmjene zraka od  $0,25 \text{ h}^{-1}$  do  $1 \text{ h}^{-1}$ , a detaljniji prikaz raspona dan je u Tablici 6.

*Tablica 6 Raspon promjena vrijednosti infiltracije*

Infiltracija za referentni model	Raspon promjene	Odabrane vrijednosti za analizu	Povećanje
$[\text{h}^{-1}]$	$[\text{h}^{-1}]$	$[\text{h}^{-1}]$	$[\%]$
0,5	0,25 – 1	0,25	-50
		0,5	0
		0,75	50
		1	100

Za svaku odabranu vrijednost iz Tablice 6 provedena je energijska simulacija, a utjecaj promjene odabranih vrijednosti infiltracije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje prikazan je Slikom 14. Utjecaj promjene infiltracije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje također je izražen u apsolutnim vrijednostima u Tablici 7. Iz rezultata analize može se zaključiti da promjena infiltracije ima veći utjecaj na potrebnu energiju za grijanje u odnosu na potrebnu energiju za hlađenje.



Slika 14 Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene infiltracije

Tablica 7 Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene infiltracije

Infiltracija	Potrebna energija za grijanje	Potrebna energija za hlađenje	Potrebna energija za grijanje i hlađenje
[h <sup>-1</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]
0,25	54,1	63,8	117,9
0,5	66,2	61,8	128
0,75	78,4	60,4	138,8
1	90,7	59,4	150,1



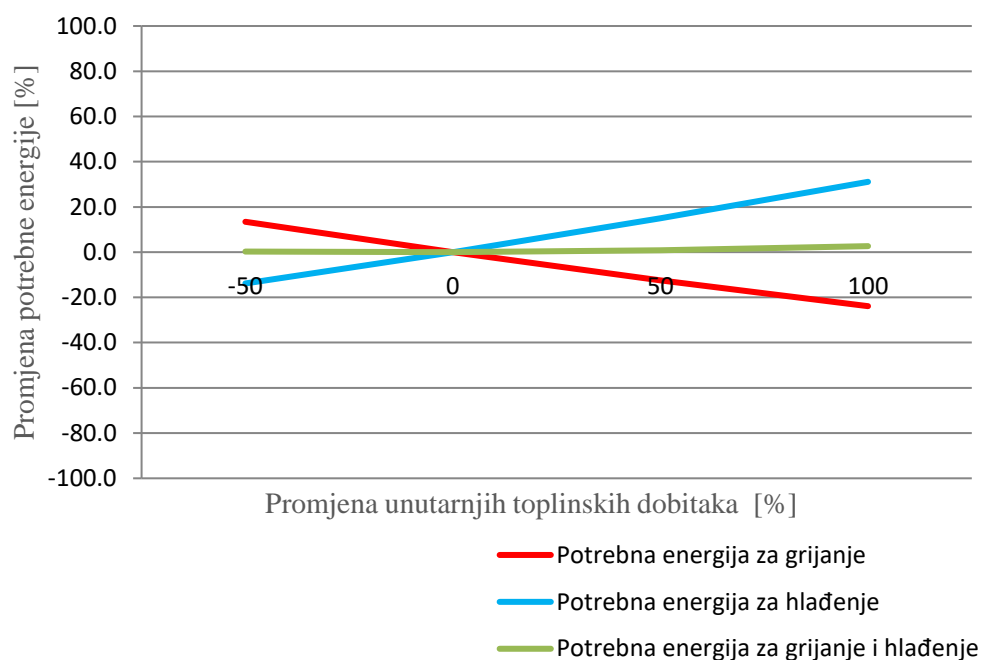
## 6.2. Utjecaj unutarnjih toplinskih dobitaka

Dobici referentnog modela definirani su prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, gdje se unutarnji toplinski dobitci od ljudi i uređaja računaju s vrijednošću od  $5 \text{ W/m}^2$  ploštine korisne površine za stambene prostore. S obzirom na nedostatak podataka o broju ljudi i uređaja analiziranog kata, definirana vrijednost za unutarnje toplinske dobitke je varirana u rasponu od  $2,5 \text{ W/m}^2$  do  $10 \text{ W/m}^2$ . Maksimalna vrijednost unutarnjih toplinskih dobitaka od  $10 \text{ W/m}^2$  definirana je na temelju pretpostavke da se u stanu od  $80 \text{ m}^2$  nalazi šest osoba koje koriste rasvjetu u svakoj prostoriji i dva računala, dok je vrijednost od  $2,5 \text{ W/m}^2$  definirana na temelju pretpostavke da u istom stanu živi jedna osoba uz minimalno korištenje rasvjete i uređaja koji odaju toplinu. Raspon toplinskih dobitaka definiran je na opisani način kako bi se analizirali svi mogući slučajevi u cilju određivanja promjene dobitaka na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Navedeni rasponi detaljnije su opisani Tablicom 8.

*Tablica 8 Raspon promjena vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka*

Unutarnji toplinski dobitci za referentni model	Raspon promjene	Odabrane vrijednosti za analizu	Povećanje
[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[%]
5	2,5 – 10	2,5	-50
		5	0
		7,5	50
		10	100

Za svaku odabranu vrijednost iz Tablice 8 provedena je energijska simulacija, a utjecaj promjene odabranih vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje prikazan je Slikom 15.



*Slika 15 Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene unutarnjih toplinskih dobitaka*

Prema rezultatima prikazanim na Slici 15 može se zaključiti da se povećanjem unutarnjih toplinskih dobitaka smanjuje potreba za grijanjem, dok se istovremeno povećava potreba za hlađenjem što rezultira neznatnim utjecajem na ukupnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Utjecaj promjene vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje, izražen u apsolutnim vrijednostima, prikazan je u Tablici 9.

*Tablica 9 Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene unutarnjih toplinskih dobitaka*

Unutarnji toplinski dobici	Potrebna energija za grijanje	Potrebna energija za hlađenje	Potrebna energija za grijanje i hlađenje
[W/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]
2,5	75,1	53,2	128,3
5	66,2	61,8	128,0
7,5	57,9	71,0	129,0
10	50,4	81,0	131,4

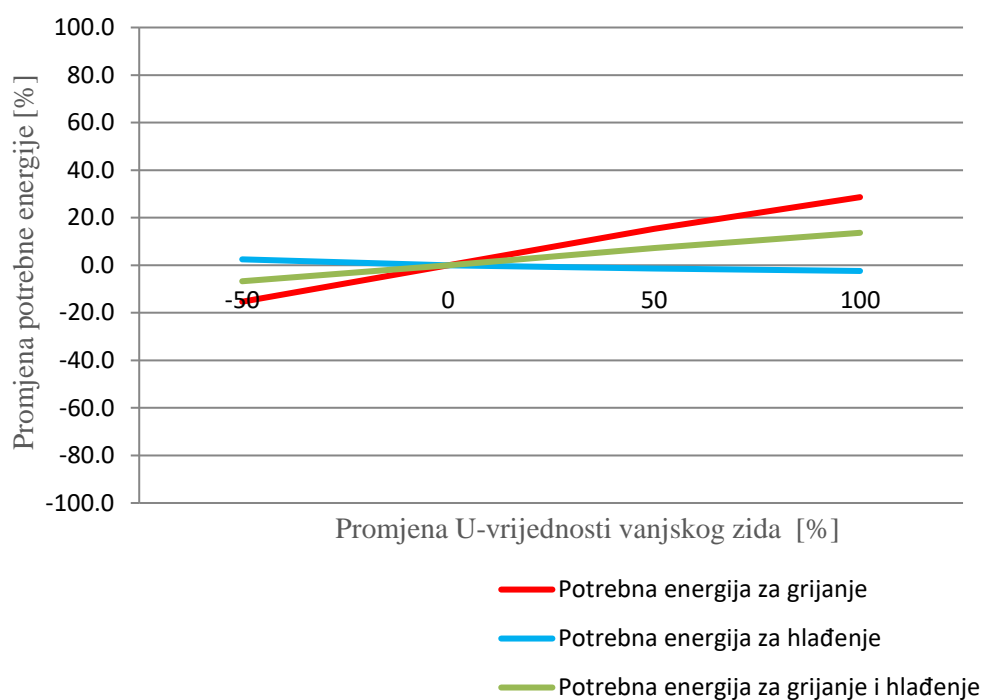
### 6.3. Utjecaj U-vrijednosti zida

Koeficijent prolaza topline od velike je važnosti za analizu ukupnih toplinskih gubitaka, a time i za potrošnju energije za grijanje i hlađenje. Prema projektnoj dokumentaciji, koeficijent prolaza topline vanjskog zida *Mamutice* iznosi  $1,071 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  za debljinu toplinske izolacije (stiropora) od 3 cm. Toplinska izolacija ima velik utjecaj na vrijednost koeficijenta prolaza topline, te je stoga u okviru ovoga rada varirana debljina postojećeg izolacijskog sloja, a samim time i vrijednost koeficijenta prolaza topline. Odabrane vrijednosti debljine stiropora te koeficijenti prolaza topline za svaku pojedinu varijaciju prikazane su Tablicom 10.

*Tablica 10 Raspon promjena U-vrijednosti*

U-vrijednost i debljina izolacije za referentni model	Raspon promjene	Odabrane U-vrijednosti i debljine izolacije	Povećanje [%]
d = 3 cm	d = 0,9 – 5,7 cm	U=0,536 W/m <sup>2</sup> K, d=5,7 cm	-50
		U=1,071 W/m <sup>2</sup> K, d=3,0 cm	0
U = 1,071 W/m <sup>2</sup> K	U = 0,536 – 2,142 W/m <sup>2</sup> K	U=1,607 W/m <sup>2</sup> K, d=1,4 cm	50
		U=2,142 W/m <sup>2</sup> K, d=0,9 cm	100

Za svaku odabranu vrijednost iz Tablice 10 provedena je energijska simulacija, a utjecaj promjene odabranih U-vrijednosti na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje prikazan je Slikom 16. Prema rezultatima prikazanim na Slici 16 može se uočiti kako se povećanjem koeficijenta prolaza topline, odnosno s manjim debljinama izolacijskog sloja, povećava potreba za grijanjem, dok se potreba za hlađenjem neznatno smanjuje, što rezultira povećanjem ukupne potrebne energije za grijanje i hlađenje. Utjecaj promjene U-vrijednosti, odnosno debljine izolacijskog sloja, na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje, prikazan je u apsolutnim iznosima u Tablici 11.



Slika 16 Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene U-vrijednosti vanjskog zida

Tablica 11 Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene U-vrijednosti vanjskog zida

U-vrijednost vanjskog zida	Potrebna energija za grijanje	Potrebna energija za hlađenje	Potrebna energija za grijanje i hlađenje
[W/m <sup>2</sup> K]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]
0,536	56,0	63,3	119,3
1,071	66,2	61,8	128,0
1,607	76,3	60,9	137,2
2,142	85,1	60,3	145,4

#### 6.4. Utjecaj toplinskog kapaciteta zida

Svaki zid sastoji se od nekoliko slojeva različitih materijala koji sa svojim toplinskim svojstvima definiraju toplinska svojstva zida te na taj način utječu na temperaturu unutar zgrade. Toplinski kapacitet zida sastavljenog od više slojeva može se iskazati jednadžbom 13:

$$C = (\rho_1 c_{p1} d_1 + \rho_1 c_{p1} d_1 + \dots + \rho_n c_{pn} d_n) \quad (13)$$

gdje su:

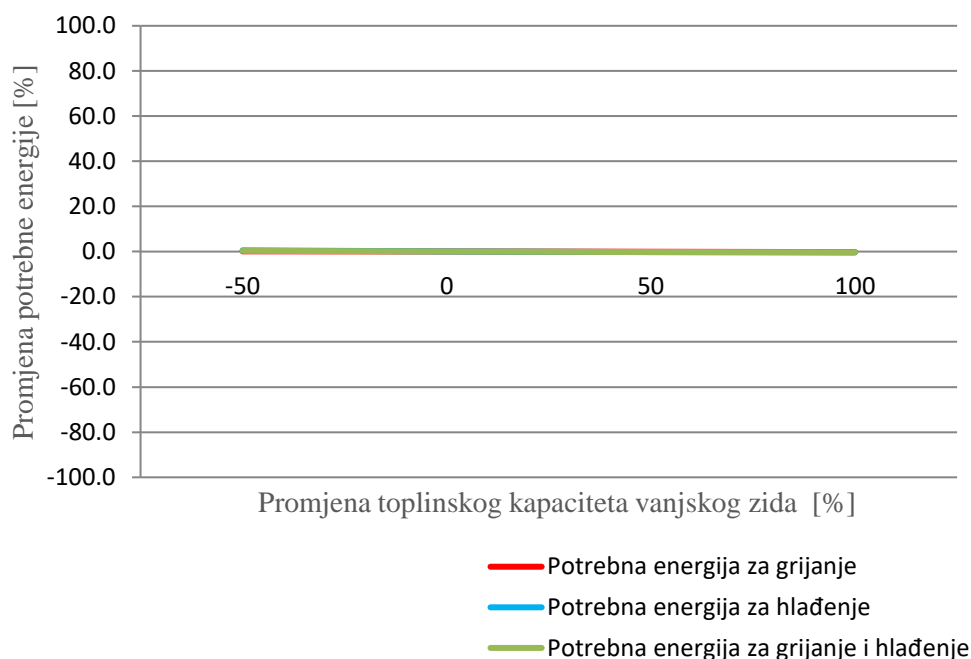
C	ukupni kapacitet vanjskog zida po m <sup>2</sup> površine zida	J/(m <sup>2</sup> K)
c <sub>pi</sub>	specifični toplinski kapacitet i-tog sloja	J/(kgK)
d <sub>i</sub>	debljina i-tog sloja	m
ρ <sub>i</sub>	gustoća i-tog sloja	kg/m <sup>3</sup>

Ukupni kapacitet vanjskog zida referentnog modela iznosi 221,5 kJ/(m<sup>2</sup>K). U cilju analiziranja utjecaja kapaciteta zida na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje, varirane su vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta za betonski sloj vanjskog zida (Tablica 2), a samim time i ukupni kapacitet zida, čiji je raspon vrijednosti prikazan Tablicom 12.

Tablica 12 Raspon vrijednosti kapaciteta zida

Toplinski kapacitet zida za referentni model	Raspon promjene	Odabrane vrijednosti za analizu	Povećanje
kJ/(m <sup>2</sup> K)	kJ/(m <sup>2</sup> K)	kJ/(m <sup>2</sup> K)	[%]
221,5	110,75 – 443	110,75	-50
		221,5	0
		332,25	50
		443	100

Za svaku odabranu vrijednost iz Tablice 12 provedena je energijska simulacija, a utjecaj promjene odabranih vrijednosti kapaciteta zida na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje prikazan je Slikom 17.



*Slika 17 Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene toplinskog kapaciteta vanjskog zida*

Prema rezultatima prikazanim na Slici 17 može se uočiti kako povećanje toplinskog kapaciteta zida ima zanemariv utjecaj na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Mogući razlog ovakvih rezultata jest temperaturni potencijal zida, odnosno razlika između unutarnje i vanjske temperature, gdje manji temperaturni potencijal uzrokuje manji utjecaj toplinskog kapaciteta zida na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Povećanjem toplinskog kapaciteta betonskog sloja zida značajno se ne mijenja maksimalna temperatura zida radi toga što su ostali parametri (mali koeficijent prijelaza topline s unutarnje strane, izolacija i veliki koeficijent prijelaza topline s vanjske strane) koji utječu na odvedeni i dovedeni toplinski tok ostali nepromijenjeni. Utjecaj promjene toplinskog kapaciteta zida na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje prikazan je u apsolutnim vrijednostima u Tablici 13.

Tablica 13 Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene toplinskog kapaciteta vanjskog zida

Toplinski kapacitet vanjskog zida	Potrebna energija za grijanje	Potrebna energija za hlađenje	Potrebna energija za grijanje i hlađenje
[kJ/(m <sup>2</sup> K)]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh/m <sup>2</sup> ]
110,75	66,2	62,1	128,4
221,5	66,2	61,8	128,0
332,25	66,1	61,6	127,7
443	66,0	61,6	127,6

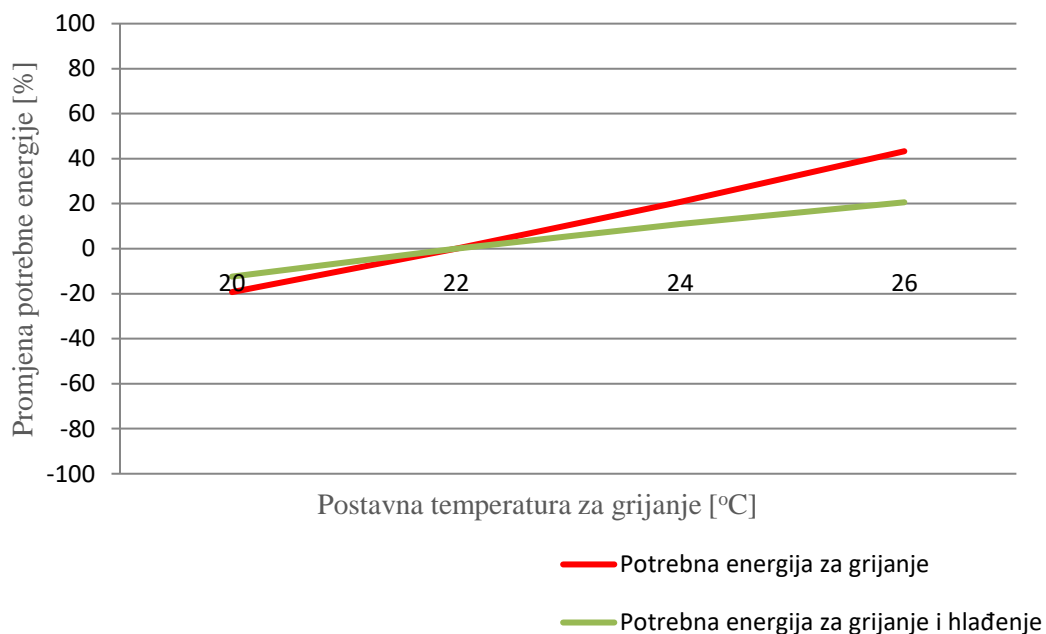
## 6.5. Utjecaj postavne temperature za grijanje i hlađenje

S obzirom da je osjećaj toplinske ugodnosti subjektivan ne postoji određeni skup veličina stanja okoliša u kojima bi svaka osoba iskazala zadovoljstvo, odnosno u skupu osoba koje borave ili obavljaju iste aktivnosti u određenom prostoru uvijek se javlja određen broj nezadovoljnih. U radu "Modeli predviđanja toplinske ugodnosti prostora" [11] laboratorijskim pristupom definirani su ključni parametri toplinske ugodnosti koji se dijele u dvije skupine. Jedni definiraju toplinsko stanje prostora, a drugi opisuju aktivnosti i toplinsku izoliranost odjećom osobe koja u tom prostoru boravi. S obzirom da osmi ulaz *Mamutice* karakterizira 130 stanova, s nedostupnim podacima o broju ljudi i razini toplinske ugodnosti pojedinog stanara, provedena je anketa u cilju analiziranja ponašanja stanara analiziranog ulaza zgrade i definiranja toplinskih stanja prostora. Rezultati ankete pokazali su velika odstupanja, osobito kada je riječ o regulaciji ventila radijatora koji utječu na postavnu temperaturu prostora. Stoga su energijske simulacije provedene za postavne temperature grijanja i hlađenja u rasponu od 20°C do 26°C (detaljnije za svaku pojedinu vrijednost u Tablici 14), dok je za referentni model za svaku prostoriju definirana postavna temperatura od 20°C u režimu grijanja i 22°C u režimu hlađenja prema Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade HRN EN ISO 13790 [6]. Pretpostavljeno je da se postavna temperatura održava 06:00 – 22:00, sedam dana u tjednu, dok je ostatak vremena sustav grijanja i hlađenja isključen.

Tablica 14 Raspon promjena postavnih temperatura za grijanje i hlađenje

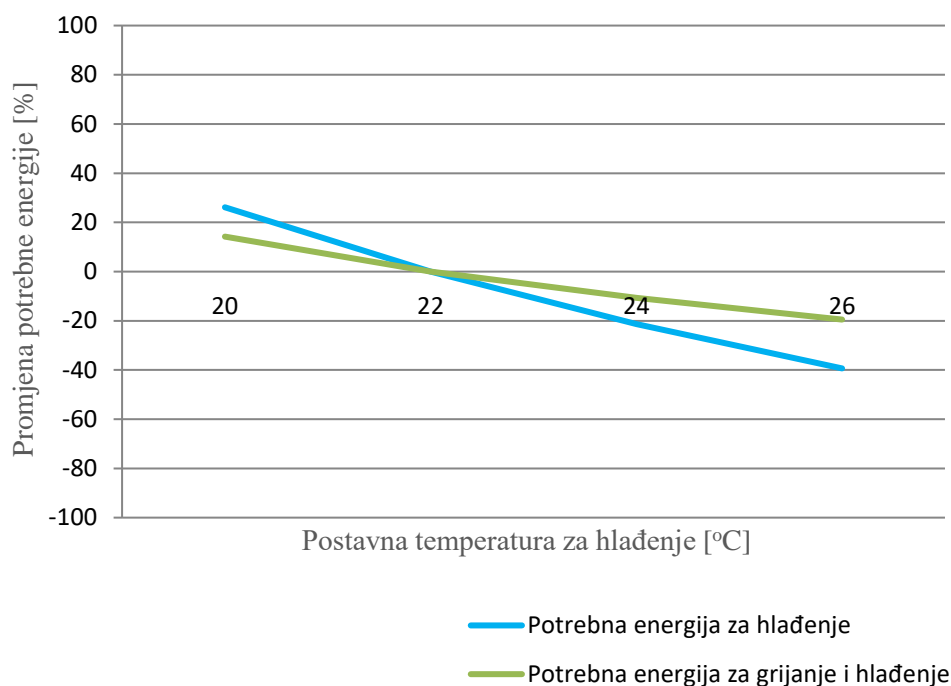
	Referentni model	Raspon promjene	Postavna temperatura	Povećanje
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
<b>GRIJANJE</b>	20	20-26	20	0
			22	+2
			24	+4
			26	+6
<b>HLADENJE</b>	22	20-26	20	-2
			22	0
			24	+2
			26	+4

Za svaku odabranu vrijednost iz Tablice 14 provedena je energijska simulacija, a utjecaj postavnih temperatura grijanja na potrebnu energiju za grijanje prikazan je Slikom 18, dok Slika 19 prikazuje utjecaj odabranih postavnih temperatura hlađenja na potrebnu energiju za hlađenje.



Slika 18 Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje za odabrane postavne temperature grijanja





*Slika 19 Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje za odabrane postavne temperature hlađenja*

Za postizanje većih postavnih temperatura grijanja potrebna je veća energija za grijanje, pri čemu model zgrade s postavnom temperaturom grijanja od 26°C zahtijeva 77,5% više energije za grijanje u odnosu na model s postavnom temperaturom grijanja od 20°C. Zbrajanjem potrebne energije za grijanje i hlađenje, energijski model zgrade s postavnom temperaturom grijanja od 26°C zahtijeva 38% više ukupne godišnje energije u odnosu na energijski model s postavnom temperaturom grijanja od 20°C.

Za postizanje nižih postavnih temperatura hlađenja potrebna je veća energija za hlađenje, pri čemu model zgrade s postavnom temperaturom hlađenja od 20°C zahtijeva čak duplo više energije za hlađenje u odnosu na model s postavnom temperaturom hlađenja od 26°C. Zbrajanjem potrebne energije za grijanje i hlađenje, energijski model zgrade s postavnom temperaturom hlađenja od 20°C zahtijeva 42% više energije za hlađenje i grijanje u odnosu na energijski model s postavnom temperaturom hlađenja od 26°C.

Utjecaj promjene postavnih temperatura grijanja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje prikazan je u apsolutnim vrijednostima u Tablici 15, dok Tablica 16 prikazuje utjecaj promjene

postavnih temperatura hlađenja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje u apsolutnim vrijednostima.

*Tablica 15 Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene postavne temperature za grijanje*

<b>Postavna temperatura za grijanje</b>	<b>Potrebna energija za grijanje</b>	<b>Potrebna energija za grijanje i hlađenje</b>
<b>[°C]</b>	<b>[kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>[kWh/m<sup>2</sup>]</b>
20	66,2	128,0
22	82,0	146,1
24	99,0	162,1
26	117,5	176,2

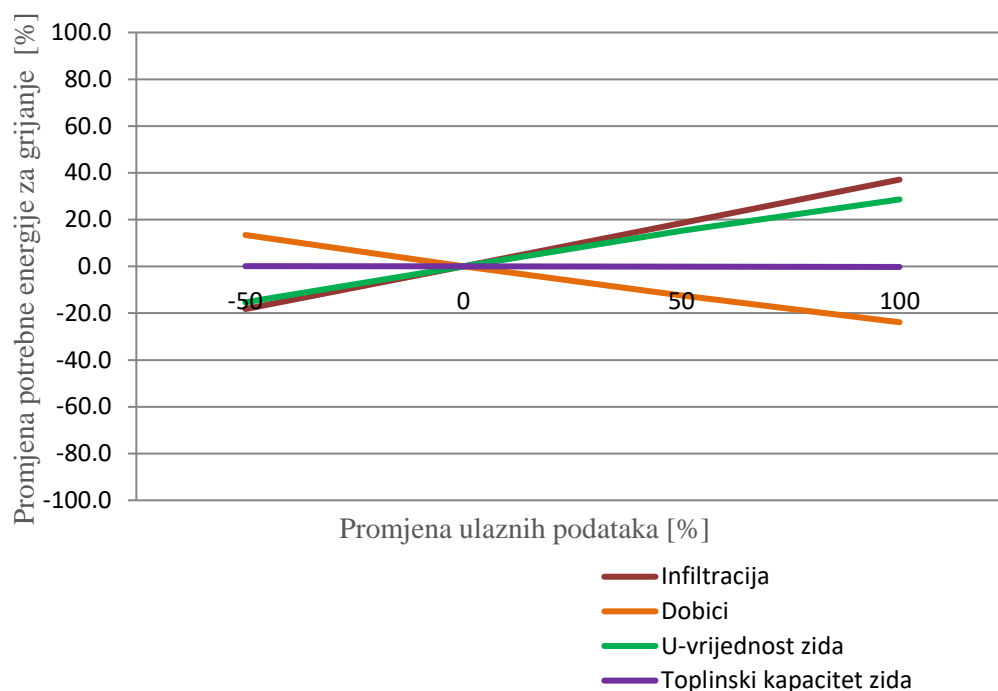
*Tablica 16 Apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene postavne temperature za hlađenje*

<b>Postavna temperatura za hlađenje</b>	<b>Potrebna energija za hlađenje</b>	<b>Potrebna energija za grijanje i hlađenje</b>
<b>[°C]</b>	<b>[kWh/m<sup>2</sup>]</b>	<b>[kWh/m<sup>2</sup>]</b>
20	77,9	146,1
22	61,8	128,0
24	48,6	114,3
26	37,5	103,0

## 6.6. Sumarni rezultati analize osjetljivosti energijskih simulacija *Mamutice*

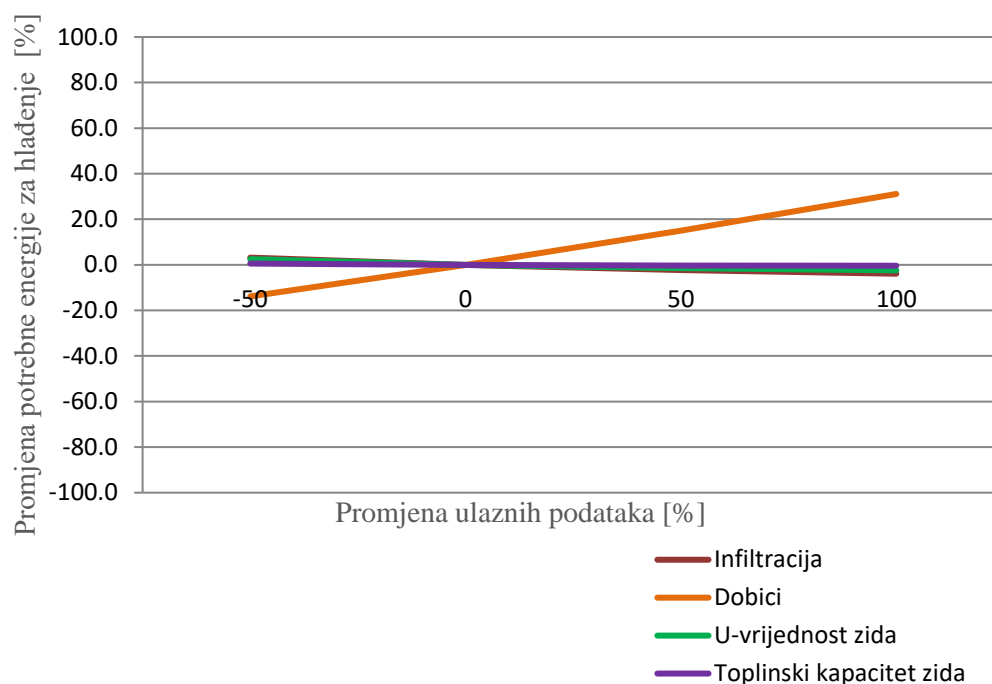
U prethodnom poglavlju opisana je analiza osjetljivosti provedena na karakterističnom katu osmog ulaza *Mamutice* za određivanje potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene infiltracije, unutarnjih toplinskih dobitaka, U-vrijednosti zida te postavnih temperatura grijanja i hlađenja. Pri tome je utjecaj raspona svakog pojedinog ulaznog parametra na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje bio prikazan u apsolutnom i postotnom obliku. U ovome dijelu svi ulazni parametri prikazani su na istom dijagramu u cilju rangiranja utjecajnosti na potrebnu energiju za grijanje, potrebnu energiju za hlađenje te na njihov zbirni rezultat, tj. ukupnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje.

Slika 19 prikazuje utjecaj promjene infiltracije, unutarnjih toplinskih dobitaka, U-vrijednosti zida te toplinskog kapaciteta zida na potrebnu energiju za grijanje. Iz rezultata se može uočiti da su najutjecajniji faktori infiltracija i U-vrijednost zida, a potom unutarnji toplinski dobici, koje nije lako mijenjati s obzirom da su povezani s brojem osoba koje borave u prostoru. Iz rezultata se također može zaključiti da je utjecaj promjene toplinskog kapaciteta zida zanemariv. Stoga, s tehničkog gledišta, u cilju postizanja ušteda energije potrebne za grijanje najbolje rješenje predstavlja promjena infiltracije analizirane zgrade i U-vrijednost zida. Kao što je već prije spomenuto, najčešće nije moguće utjecati na promjenu unutarnjih toplinskih dobitaka jer su povezani s brojem osoba koje borave u prostoru, međutim, prikazani rezultati daju jasan prikaz koliko pogrešna procjena unutarnjih toplinskih dobitaka može utjecati na konačnu procjenu potrošnje energije zgrade.



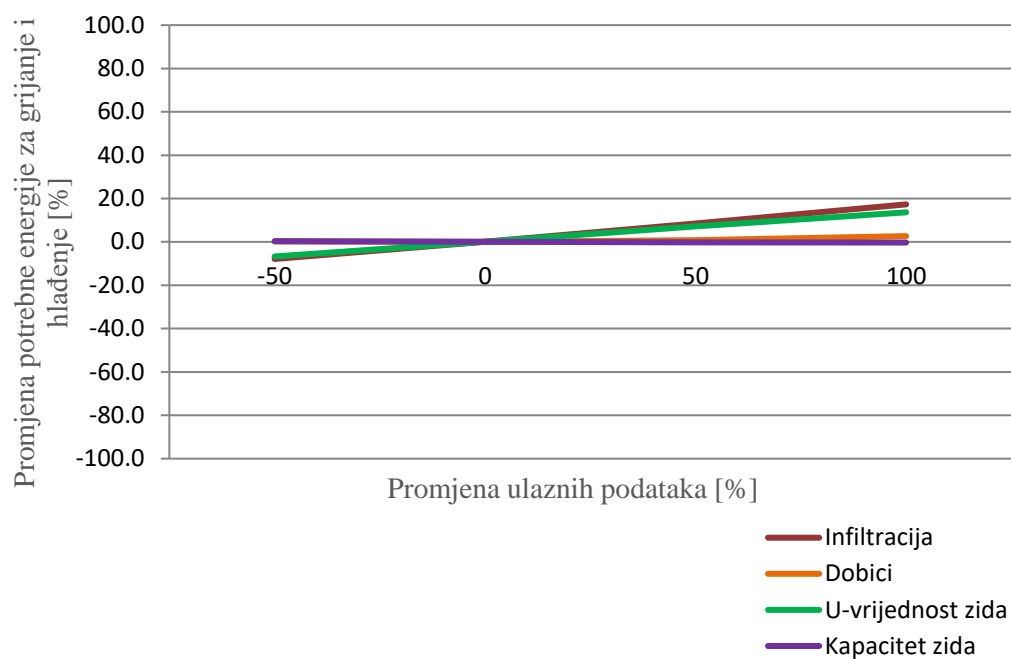
Slika 20 Promjena potrebne energije za grijanje uslijed promjene utjecajnih veličina

Utjecaj promjene infiltracije, unutarnjih toplinskih dobitaka, U-vrijednosti zida te toplinskog kapaciteta zida na potrebnu energiju za hlađenje prikazan je Slikom 21. Iz rezultata se može uočiti da je promjena unutarnjih toplinskih gubitaka najutjecajniji faktor na potrebnu energiju za hlađenje, dok ostali ulazni podaci imaju neznatan utjecaj. Rashladna energija se u najvećem dijelu koristi za odvođenje dobitaka od Sunca i unutarnjih toplinskih dobitaka. Kao što je već spomenuto, u okviru ovoga rada nisu analizirane promjene g-vrijednosti prozora (s obzirom da su U-vrijednost prozora i g-vrijednost prozora međusobno zavisne varijable) te stoga utjecaj promjene dobitaka od Sunca nije vidljiv. Spomenuta analiza izlazi iz okvira lokalne analize osjetljivosti te je za navedeni slučaj potrebno primijeniti jednu od metoda globalne analize osjetljivosti. Međutim, može se zaključiti da bi utjecaj g-vrijednosti zida bio vrlo sličan utjecaju unutarnjih toplinskih dobitaka na ukupnu potrebnu energiju, odnosno da greška u procjeni unutarnjih toplinskih dobitaka i dobitaka od Sunca može dovesti do velikih pogrešaka u procjeni potrebne energije za hlađenje (Slika 20).



Slika 21 Promjena potrebne energije za hlađenje uslijed promjene utjecajnih veličina

Utjecaj promjene infiltracije, unutarnjih toplinskih dobitaka, U-vrijednosti zida te toplinskog kapaciteta zida na ukupnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje prikazan je Slikom 22. Može se uočiti da je promjena infiltracije najutjecajniji ulazni podatak na ukupnu potrebnu energiju, čiji raspon promjene od -50% do 100% uzrokuje promjenu potrebne energije u rasponu od -7,9% do 17,3%. Nadalje, raspon promjene U-vrijednosti od -50% do 100% uzrokuje promjenu potrebne energije u rasponu od -6,7% do 13,6%. Povećanjem unutarnjih toplinskih dobitaka smanjuje se potrebna energija za grijanje, dok istovremeno raste potrebna energija za hlađenje, što rezultira neznatnim utjecajem na njihov zbroj (raspon promjene od 0,3% do 2,7%). Kapacitet zida može se zanemariti s obzirom na to da promjena u rasponu od -50% do 100% uzrokuje promjenu potrebne energije u rasponu od -0,3% do 0,3%. Stoga, može se zaključiti da na točnost procjene ukupne potrošnje energije za grijanje i hlađenje najveći utjecaj imaju infiltracija i U-vrijednost zida.



Slika 22 Promjena potrebne energije za grijanje i hlađenje uslijed promjene ulaznih podataka

## 7. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan proces analize osjetljivosti energijskog modela stambene zgrade *Mamutica* u cilju pronalaska najutjecajnijih ulaznih parametara na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Analiza osjetljivosti predstavlja formalizirani postupak za identifikaciju učinka promjena u različitim komponentama modela na rezultat modela, odnosno predstavlja tehniku sistematske promjene ulaznih veličina modela u cilju analiziranja posljedica takvih promjena. U okviru ovoga rada provedena je lokalna analiza osjetljivosti radi određivanja razlike u rezultatima simulacije uzrokovane isključivo promjenama jednog od sljedećih variranih ulaznih parametara: infiltracije, unutarnjih toplinskih dobitaka, U-vrijednosti vanjskog zida, toplinskog kapaciteta vanjskog zida te postavni temperatura za grijanje i hlađenje u cilju analiziranja različitih preferencija toplinske ugodnosti stanara *Mamutice* na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Promjene U-vrijednosti i g-vrijednosti prozora nisu analizirane u okviru ovoga rada s obzirom da se radi o međusobno zavisnim varijablama, što izlazi iz okvira lokalne analize osjetljivosti. Međutim, može se zaključiti da utjecaj U-vrijednost prozora ima vrlo sličan utjecaj U-vrijednosti zida, dok je utjecaj g-vrijednosti vrlo sličan utjecaju unutarnjih toplinskih dobitaka na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. U radu je prikazan utjecaj svakog od utjecajnih parametara na potrebnu energiju za grijanje, potrebnu energiju za hlađenje te na njihov zbroj, odnosno potrebnu energiju za grijanje i hlađenje.

Za simulaciju toplinskog odziva analizirane zgrade u ovisnosti o utjecajnim parametrima korišten je detaljni računalni program TRNSYS, a za ulazne parametre zgrade korištene su dostupna projektna dokumentacija prikupljena u arhivi Gradskog ureda za opću upravu grada Zagreba te informacije dobivene od stanara zgrade. Izrađeni model sadrži geometriju osmog ulaza zgrade, orijentaciju i nagib ploha, odabrane materijale i debljinu pojedinih građevinskih elemenata, podjelu na toplinske zone, dobitke od ljudi, rasvjete i opreme, kvantitativne podatke za infiltraciju, postavne unutarnje temperature te raspoložive kapacitete za grijanje i hlađenje. Nakon provedene energijske simulacije dobivena je potrebna energija za grijanje i hlađenje osmog ulaza *Mamutice*, gdje je usporedbom dobivenih rezultata uočeno da nema znatnih odstupanja između potrebne energije za grijanje i hlađenje pojedinih katova. Stoga je karakteristični kat definiran kao referentni model na kojem je provedena analiza osjetljivosti u cilju analize utjecaja glavnih utjecajnih veličina na toplinski odziv i energijska svojstva analizirane zgrade.

Rezultati analize pokazuju da je promjena infiltracije najutjecajniji ulazni parametar na ukupnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje, čiji raspon promjene od -50% do 100 % uzrokuje promjenu potrebne energije za grijanje i hlađenje u rasponu od -7,9% do 17,3 %. Drugi parametar po važnosti jest U-vrijednost zida, pri čemu raspon promjene od -50% do 100% uzrokuje promjenu ukupne potrebne energije u rasponu od -6,7% do 13,6%. Povećanjem unutarnjih toplinskih dobitaka smanjuje se potrebna energija za grijanje, dok istovremeno raste potrebna energija za hlađenje, što rezultira neznatnim utjecajem na njihov zbroj, odnosno ukupnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje (raspon promjene od 0,3% do 2,7%). Kapacitet zida za analizirani primjer ima zanemarivi utjecaj na rezultate simulacije, pri čemu promjena toplinskog kapaciteta u rasponu od -50% do 100% uzrokuje promjenu potrebne energije za grijanje i hlađenje u rasponu od -0,3% do 0,3%. Ukoliko se promatraju odvojeno potrebna energija za grijanje i potrebna energija za hlađenje, rezultati analize pokazuju da su infiltracija i U-vrijednost zida najutjecajniji parametri na potrebnu energiju za grijanje, dok je promjena unutarnjih toplinskih dobitaka najutjecajniji parametar na potrebnu energiju za hlađenje. Dodatno, provedena je anketa u cilju analiziranja ponašanja stanara zgrade i definiranja toplinskih stanja prostora. Rezultati ankete pokazali su velika odstupanja, osobito kada je riječ o regulaciji ventila radijatora koji utječu na postavnu temperaturu prostora. Stoga su energijske simulacije provedene za postavne temperature grijanja i hlađenja u rasponu od 20°C do 26°C. Model zgrade s postavnom temperaturom grijanja od 26°C zahtijeva 77,5% više energije za grijanje u odnosu na model s postavnom temperaturom grijanja od 20°C, dok model zgrade s postavnom temperaturom hlađenja od 20°C zahtijeva čak duplo više energije za hlađenje u odnosu na model s postavnom temperaturom hlađenja od 26°C.

Iz dobivenih rezultata moguće je odrediti, ne samo kvalitativno već i kvantitativno, utjecaj krive pretpostavke svakog pojedinog parametra na konačan rezultat. Osim toga, na temelju dobivenih rezultata može se prikazati utjecaj implementacije određene mjere na uštede energije i povećanje energetske učinkovitosti. Dobiveni rezultati analize osjetljivosti bit će korišteni u narednim znanstvenim istraživanjima kao temelj za usporedbu rezultata simulacije s podacima o stvarnoj potrošnji energije u zgradi. Također, korištenjem rezultata simulacije moguće je razviti pojednostavljeni energijski model koji će se koristiti za analizu većeg broja zgrada unutar definiranih granica te koji mogu imati mnogobrojne namjene, na primjer, mogu se koristiti pri ocjeni učinka provedenih mjera energetske učinkovitosti te u energetske planiranju u sektoru toplinarstva.



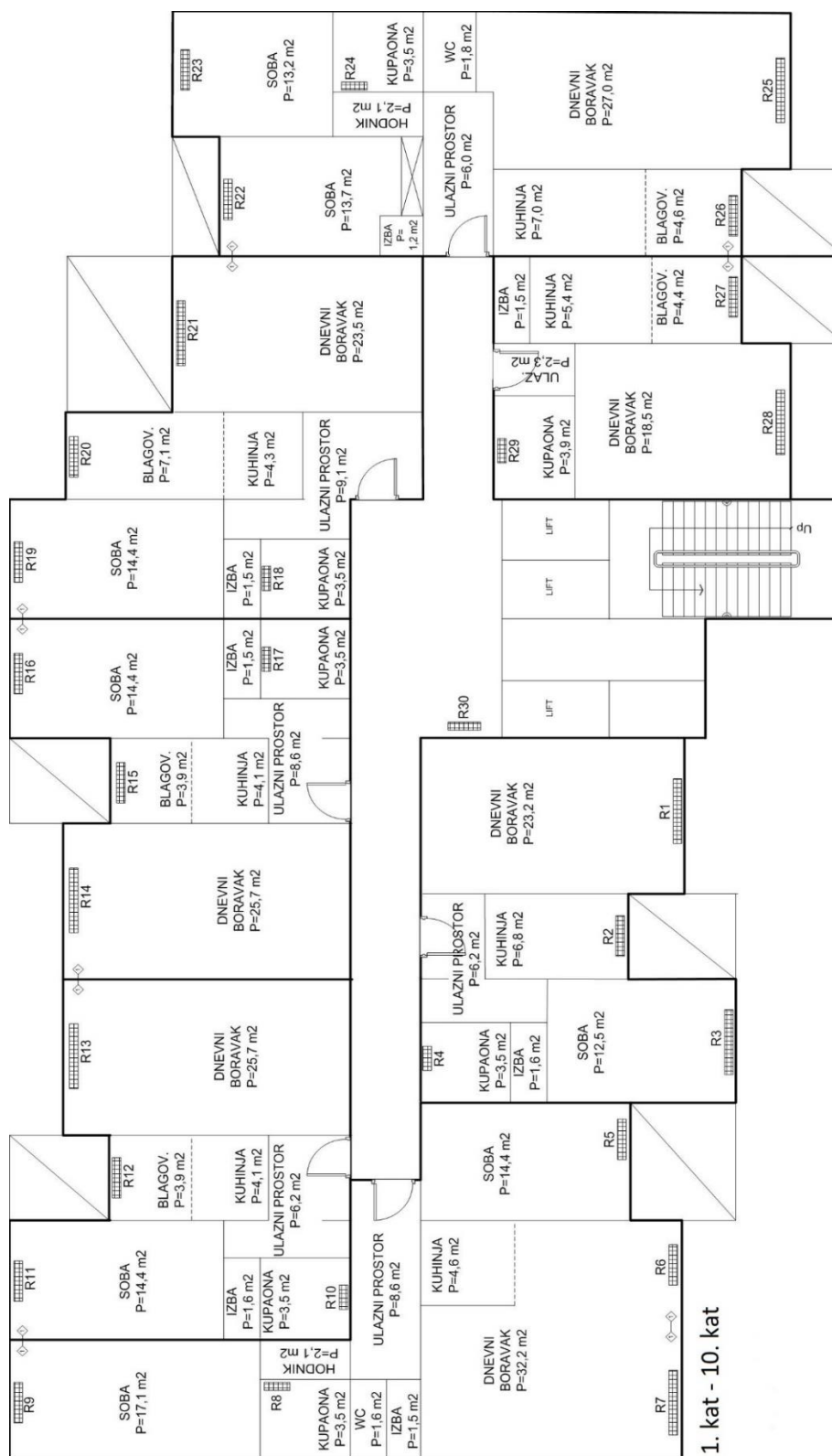
## LITERATURA

- [1] URL: [https://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014\\_10\\_127\\_2399.html](https://narodnenovine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2014_10_127_2399.html), (2018-10-01)
- [2] BPIE (2011), Europe's buildings under the microscope: A country-by-country review of the energy performance of buildings, Technical report, Buildings Performance Institute Europe (BPIE), Bruxelles
- [3] URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Mamutica>, (2018-10-06)
- [4] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, (NN 128/15)
- [5] TRNSYS 17, Volume 4, Mathematical Reference, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin – Madison, 2012
- [6] Soldo, Vladimir; Novak, Silvio; Horvat, Ivan, Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017
- [7] D. Mundar, Kvantitativni menadžment, skripta, Fakultet organizacije i informatike, Sveučilište u Zagrebu, 25.5.2012.
- [8] Stjelja Davor, Advanced energy analysis method for optimal building retrofit design, Master's thesis, Faculty of Mechanical Engineering, Delft University of Technology, 2013
- [9] W.Tian, "A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 20, pp. 411-419, 2013
- [10] Fabrick P.H., Sensitivity analysis of residential building simulations, Master of science thesis, Faculty of Mechanical and Materials Engineering, Delft University of Technology, 2013
- [11] Wolf Igor, Modeli predviđanja toplinske ugodnosti prostora, 2009

## **PRILOZI**

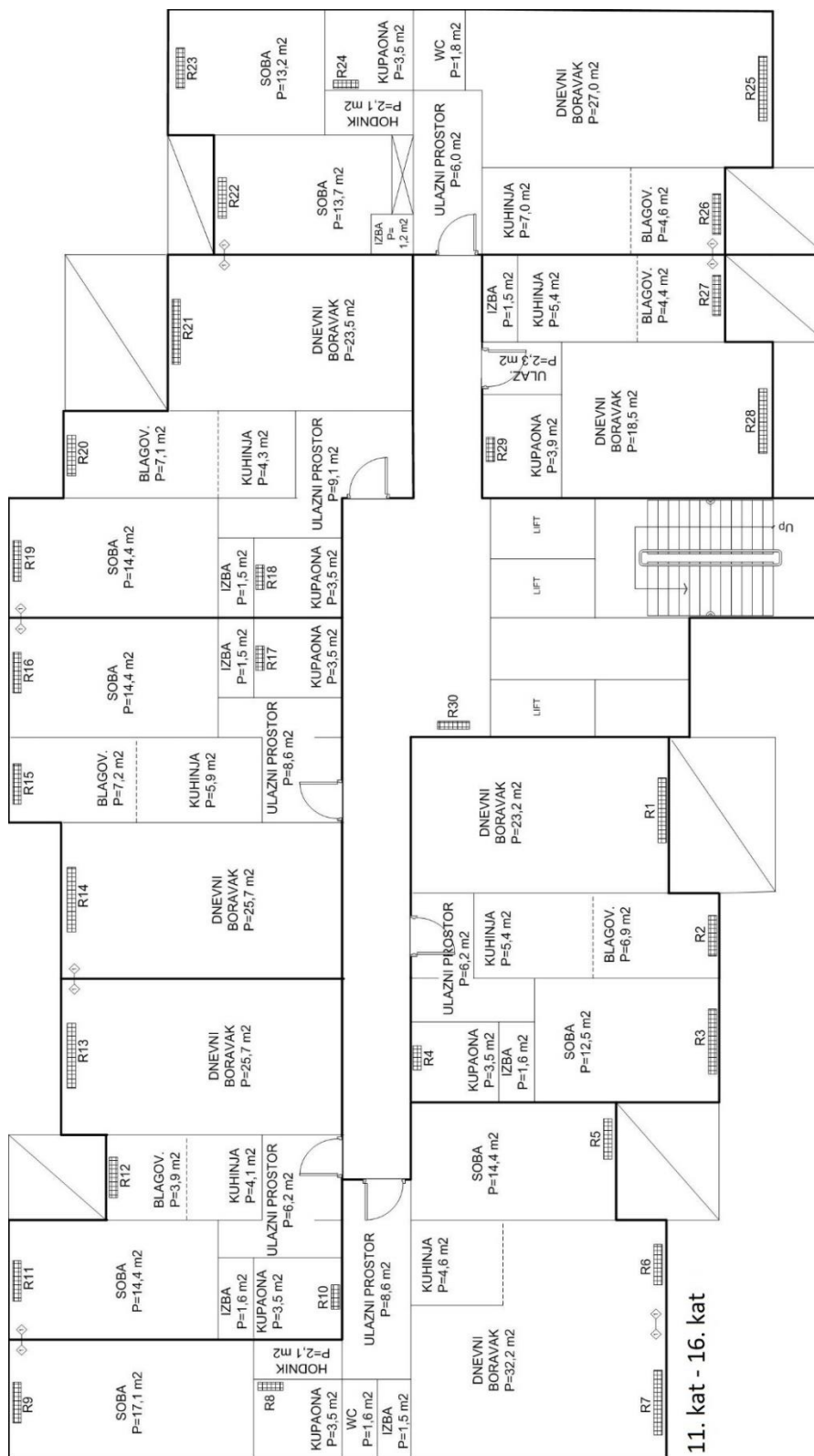
- I. Tlocrt osmog ulaza *Mamutice* od 1.kata – 10.kata
- II. Tlocrt osmog ulaza *Mamutice* od 11.kata – 16.kata
- III. Tlocrt osmog ulaza *Mamutice*, 17.kat
- IV. Tlocrt osmog ulaza *Mamutice*, 18. kat
- V. Tlocrt osmog ulaza *Mamutice*, 19. kat

## PRILOG I



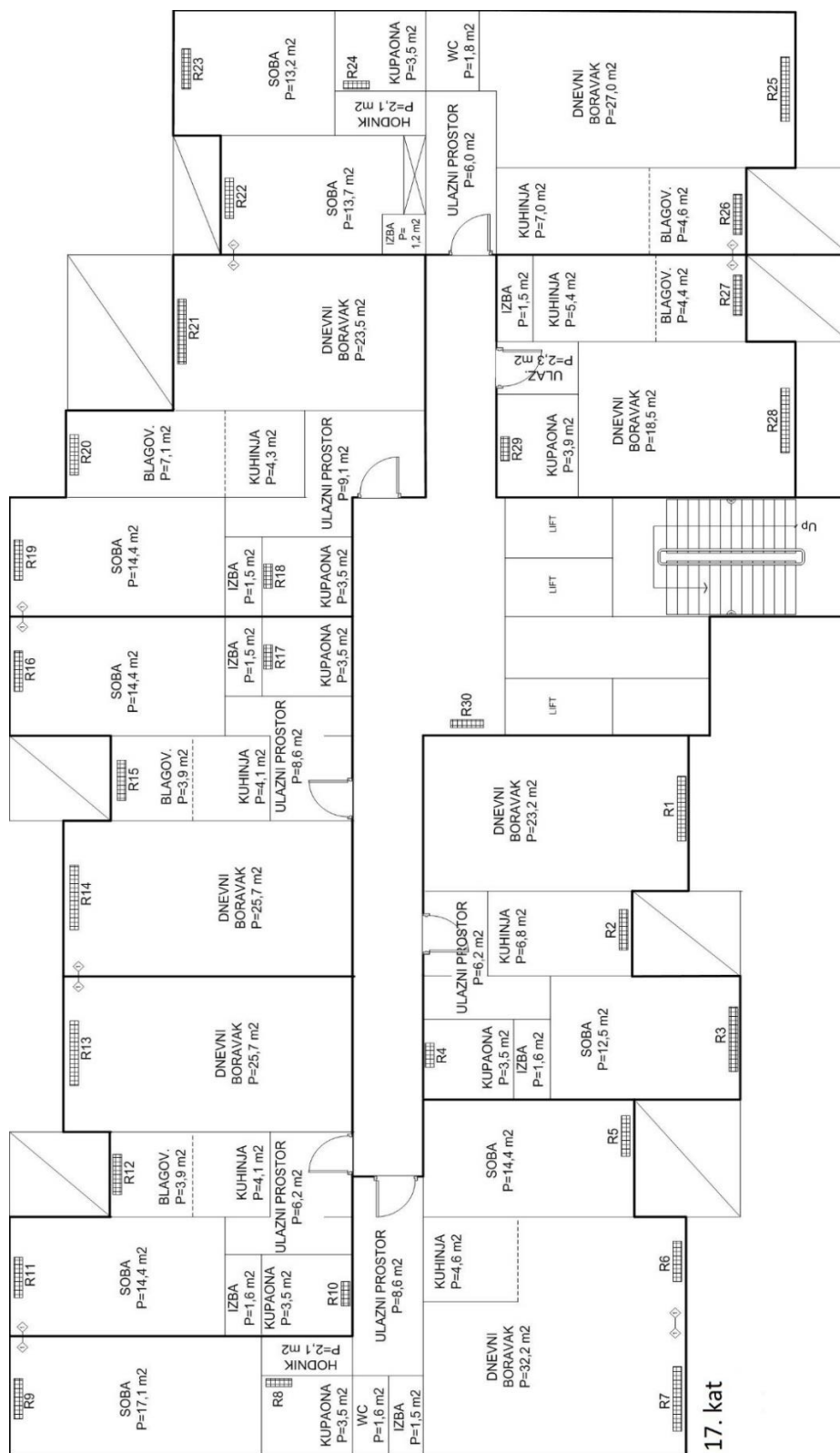
*Slika 23 Tlocrt osmog ulaza Mamutice od 1. kata – 10. kata*

## PRILOG II



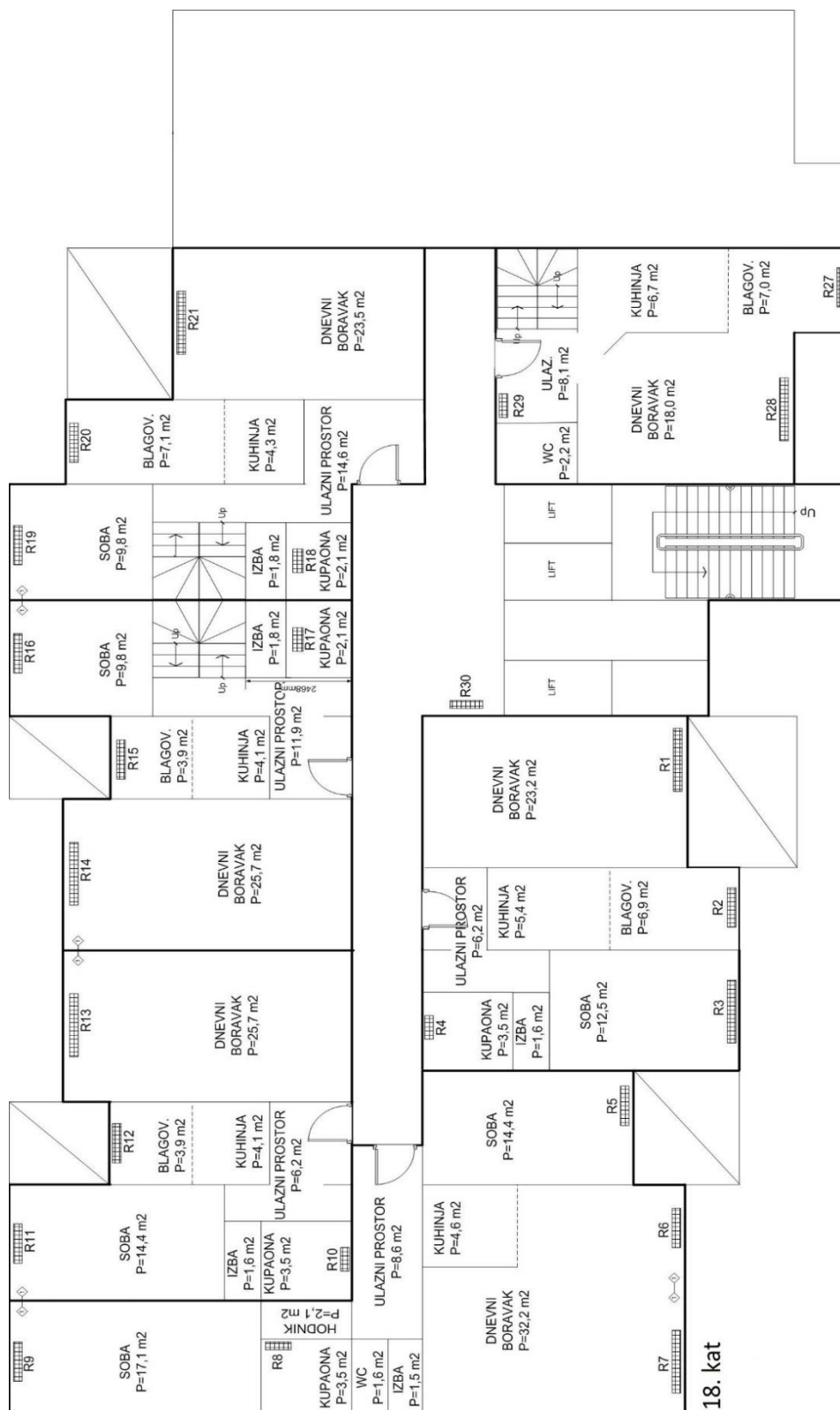
Slika 24 Tlocrt osmog ulaza Mamutice od 11.kata – 16. kata

## PRILOG III



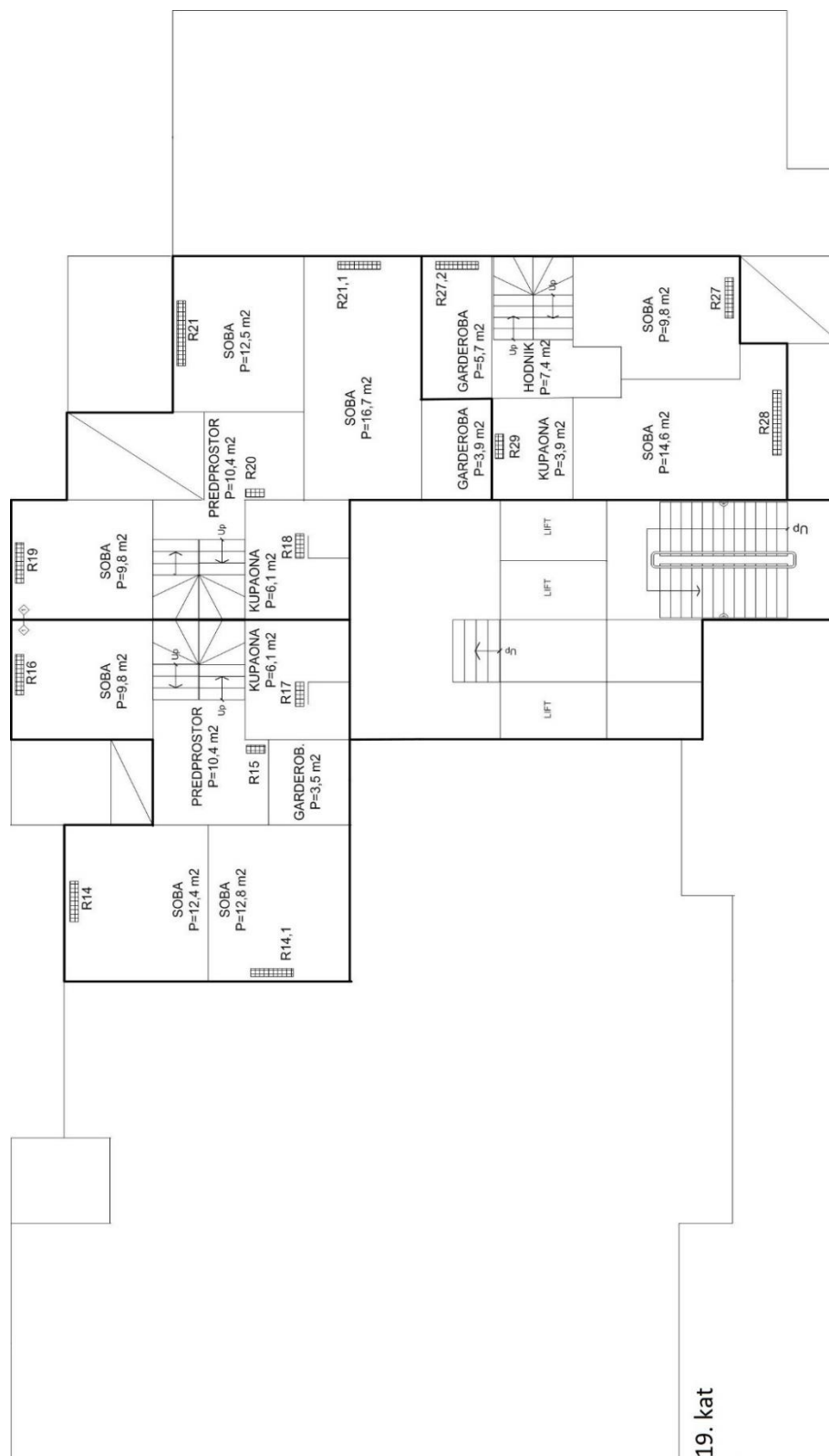
*Slika 25 Tlocrt osmog ulaza Mamutice, 17. kat*

## PRILOG IV



Slika 26 Tlocrt osmog ulaza Mamutice, 18. kat

## PRILOG V



Slika 27 Tlocrt osmog ulaza Mamutice, 19. kat